

**UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA**  
**Faculté des sciences agronomiques et vétérinaires**  
Département d'agronomie

## **MEMOIRE DE MAGISTER**

Spécialité : AGRO-RESSOURCES

IMPACT DES SELS NOCIFS SUR LE COMPORTEMENT ECO  
PHYSIOLOGIQUE DE LA CULTURE DE TOMATE (*LYCOPERSICUM*  
*ESCULUNTUM MILL*) VARIETE MARMANDE CULTIVEE DANS UN MILIEU  
SALIN NATUREL

Par  
**MOHAMED ABBAD**

Devant le jury composé de :

F.Z.BENREBIHA	Maître de conférences A. USD. Blida	Présidente
S.A. SNOUSSI	Professeur, USD. Blida	Promoteur
S. MEGATELI	Maître de conférences B. USD. Blida	Co-promoteur
M. BESSENASSE	Maître de conférences A. USD. Blida	Examineur
Z.D. DJAZOULI	Maître de conférences A. USD. Blida	Examineur

**Blida, Octobre 2011**

## Remerciements

Grâces à dieu le tout puissant qui ma donné le courage, la volonté et la santé pour terminer mes études et préparer ce mémoire.

Tous mes remerciements vont d'abord à Mr le Professeur, SNOUSSI S.A pour avoir accepté de diriger ce travail, qu'il trouve ici, l'expression de ma profonde reconnaissance, mon immense gratitude et mon grand respect, pour tous ses efforts, son savoir, ses idées, sa confiance et ses encouragements.

Je tiens à remercier également le Dr. S. MEGATELI, mon co-promoteur, d'avoir accepté de diriger une partie de ce travail et pour son aide et ses conseils précieux.

Mes remerciements s'adressent particulièrement à M<sup>me</sup> F.Z. BENREBIHA maître de conférences (A) à la faculté des sciences agrovétérinaire de m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury. Qu'elle trouve ici ma reconnaissance et mon respect les plus sincères.

Mes sincères remerciements vont à Mr M. BESSENASSE maitre de conférences (A) à la Faculté des sciences Ingénieur, Université SAAD Dahleb du Blida pour sa participation comme membre de jury. Je lui exprime mon profond respect.

Mes remerciements s'adressent également à Mr Z.D. DJAZOULI maître de conférences (A) à la faculté de sciences agrovétérinaire, de m'avoir fait l'honneur de participer au jury. Je lui exprime ma profonde gratitude pour ces précieux conseils et son orientation.

Mes vifs remerciements, mes profondes reconnaissances et gratitude s'adressent tout particulièrement à notre chef département Pr A. GUENDOUZ spécialiste Protection des végétaux pour tous ses conseils, son orientation, sa générosité et son savoir qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

Je remercie également Mme L. ALLAL-BENFEKIH de la Faculté des sciences agronomiques, Université Saad Dahled du Blida, pour ses conseils, son aide et sa gentillesse. Je tiens également à remercier le chef de département de la chimie industriel pour toutes ces aides et sa disponibilité.

Il m'est agréable d'exprimer mes remerciements à tous mes amis qui m'ont aidé pour le bon achèvement de ce travail.

## Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à la mémoire de ma mère Zhor qui repose en paix,

A mon père SAAD ma source de tendresse et de courage

A mes frères, Missoum, Mustapha ;

A mes sœurs : Fatima, Aicha, Saliha Fadhila Imane et la petite Meriem ;

Mes beaux-frères : Abdelkader, Mohamed, Mustapha, Sid-Ali et Saïd ;

Et mes neveux: Mohamed, Youness, Khaled, Firdaousse, Yacer, Wassila, Abobakher,  
Fatima-Zahra, Khadidja et Mohamed-Yakoub

A mes amis qui font mon équilibre, pour leur présence dans ma vie : Zouaoui, Cherrafa,  
Soraya, Billel, Khaled, Hamid, Chebli, Hamdani, Oussmane, Omar, Rafik, Amina; Lamia  
Kamel; Rhiad.

Et tous qui connaissent

MOHAMED ABBAD

## Résumé

Notre étude à portée sur l'espèce tomate, variété Saint-pierre qui est une plante moyennement sensible à la salinité. Ainsi nous avons pratiqué une application des traitements salins (03), salins corrigés (03) et un témoin.

Pour étudier la réponse de la tomate aux différents traitements testés dans notre expérimentation, nous avons effectué des mesures biométriques, des dosages de paramètres éco physiologiques des organes végétatifs et des paramètres organoleptiques des fruits.

L'addition de nutriments à la solution saline naturelle a amélioré considérablement la croissance et le développement de ces plantes notamment à travers la plus part des paramètres biométriques mesurés.

Il y a une accumulation plus importante de sucres solubles et de la chlorophylle dans les feuilles des plants qui sont arrosés par les traitements salins corrigés. Cette remarque reste valable pour l'accumulation de la proline dans les différentes parties de la plante (racine, tige, feuille basale, feuille médiane et feuille apicale) et ce compte tenu l'osmolarité externe plus forte, ce qui nécessite pour la plante un ajustement de l'osmolarité interne encore plus forte ce qui se traduit par une production accrue de proline.

**Mots clés** : tomate - stress salin - écophysiologie -proline - chlorophylle- salinité.

## **Abstract**

Our study with range on the species tomato, Saint-stone variety which is a plant fairly sensitive to salinity. Thus we practiced an application of the saline treatments (03), saline corrected (03) and a witness.

To study the response of tomato to the various treatments tested in our experimentation, we took biometric measurements, proportionings of physiological parameters éco of the vegetative bodies and organoleptic parameters of the fruits.

The addition of nutrients to the natural saline solution improved considerably the growth and the development of these plants in particular through more the share of the measured biometric parameters.

There are a more important accumulation of soluble sugars and chlorophyl in the sheets of the seedlings which are sprinkled by the corrected saline treatments. This remark remains valid for the accumulation of the proline in the various parts of the plant (root, stem, basal sheet, median sheet and apical sheet) and this taking into account the stronger osmolarity external, which requires for the plant an adjustment of the osmolarity interns even stronger what results in an increased production of proline.

**Key words:** tomato - saline stress - ecophysiology - proline - chlorophyl salinity.

## الملخص

يهدف هذا العمل إلى دراسة تأثير الملوحة على نبات الطماطم " *Solanum Lycopersicum* صنف "Saint-Pierre" الذي هو حساس للملوحة. المسقية بسبعة محاليل مختلفة هي:

- ثلاث محاليل مالحة طبيعياً (محلول 1, محلول 2, محلول 3)
- تصحيح هذه المحاليل الثلاثية بإضافة أحماض و مواد مغذية
- محلول مغذي معدل يستعمل للمقارنة

قمنا بدراسة المؤشرات الفيزيولوجية, المورفولوجية و البيوكيميائية لنباتات الطماطم لمدة 142 يوم مسقية بالمحاليل المبينة سابقاً.

لاحظنا أن سلوك الصنف المسقي بالمحاليل الثلاثة الأولى تأثر لوجود كميات كبيرة من الملح في هذا الوسط بينما يزداد تطور الصنف الثاني المسقي بمحاليل المعدلة كما في الشاهد. النتائج التي حصلنا عليها تؤكد إنتاج كميات كبيرة للبرولين و السكرية المذابة في الصنفين الثاني و الشاهد .

**الكلمات المفتاحية :** الطماطم - الملوحة- المؤشرات الفيزيولوجية - للبرولين- السكرية المذابة.

## TABLE DES MATIERES

RESUME	
REMERCIEMENT	
TABLE DES MATIERES	
LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX	
INTRODUCTION.....	15
<b>CHAPITRE 1. LA CULTURE DE TOMATE.....</b>	<b>16</b>
1.1. Généralités.....	16
1.2. Description botanique.....	17
1.3. Intérêt scientifique.....	17
1.4. Avantages de la tomate.....	17
1.5. Classification.....	18
1.6. Composition des feuilles et du fruit de tomates.....	18
1.7. Importance économique et production mondiale actuelle.....	19
1.8. Importance de la tomate en Algérie.....	21
1.9. Exigence de la culture de tomate.....	22
1.10. Opérations d'entretiens.....	24
1.11. Maladies et moyennes de lutte de la tomate.....	24
1.12. Protection intégrée de la tomate.....	26
<b>CHAPITRE 2. LA CULTURE HYDROPONIQUE.....</b>	<b>27</b>
2.1. Généralité.....	27
2.2. Définition.....	27
2.3. Les atouts des cultures hors sol.....	28
<b>CHAPITRE 3. SALINITE DES SOLS ET DES EAUX D'IRRIGATION.....</b>	<b>31</b>
3.1. Généralités .....	31
3.2. Notion de la salinité.....	31
3.3. La salinité dans le monde.....	33
3.4. Répartition des sols salés en Algérie.....	33
3.5. Les différents types de salinisation.....	36
3.6. Classification des sols salins.....	38
3.7. Les causes de la salinité.....	38

3.8. Les conséquences de la salinité.....	40
3.9. Classification des plantes.....	44
3.10. Toxicité des sels.....	45
3.11. La tolérance des plantes à la salinité.....	46
3.12. Possibilités de réduction de la salinité.....	49
<b>CHAPITRE 4. NUTRITION HYDROMINERALE DES PLANTES.....</b>	<b>51</b>
4.1. Généralités.....	51
4.2. Nutrition hydrique.....	51
4.3. Nutrition minérale.....	52
4.4. Constituant minéraux des plantes.....	54
4.5. Les éléments majeurs.....	56
4.6. Les éléments mineurs.....	60
<b>CHAPITRE 5. MATERIEL ET METHODES.....</b>	<b>64</b>
5.1. Objectif d'expérimentation.....	64
5.2. Matériel végétal.....	64
5.3. Conditions expérimentales.....	64
5.4. Essai de germination.....	64
5.5. Dispositif expérimental.....	69
5.6. Analyse statistique.....	69
5.7. Description des différents traitements.....	71
5.8. Composition des solutions nutritives et techniques de préparation des différents traitements.....	72
5.9. Formule de solution nutritive pour une eau naturelle peu chargée en ions : Cas de l'eau de Blida transformé en solution nutritive (T4).....	72
5.10. Formule de solution nutritive pour une eau naturelle chargée en ions : Cas de l'eau d'oued Chélif.....	76
5.11. Entretien de la culture.....	82
5.12. Dosage des paramètres physiologiques.....	84
5.13. Dosage des paramètres technologiques.....	86
<b>CHAPITRE 6. RESULTATS ET DISCUSSION.....</b>	<b>89</b>
6.1. Paramètres de croissance.....	89

6.1.1 Aspect générale des plantes.....	89
6.1.2 La vitesse de croissance des plantes.....	91
6.1.3 Hauteur finales des plantes.....	92
6.1.4 Diamètre des tiges.....	93
6.1. 5 Nombre des feuilles.....	94
6.1. 6 Biomasses fraîches totales.....	95
6.1. 7 Biomasses fraîches des feuilles.....	96
6.1. 8 Biomasses fraîches des tiges.....	97
6.1. 9 Biomasses fraîches des racines.....	98
6.1. 10 Longueur des racines.....	99
6.1. 11 Biomasse sèche totale .....	100
6.1. 12 Biomasse sèche des feuilles.....	101
6.1. 13 Biomasse sèche des tiges.....	101
6.1. 14 Biomasse sèche des racines .....	102
6.1. 15 Matière sèche totale.....	103
6.1. 16 Matière sèche des feuilles.....	104
6.1. 17 Matière sèche des tiges.....	105
6.2. Les paramètres physiologiques.....	106
6.2.1 Taux du proline dans les différents organes de la plante .....	107
6.2.2 Taux de la chlorophylle (A) .....	108
6.2.3 Taux de la chlorophylle (B) .....	109
6.2.4 Taux de la chlorophylle (C) .....	110
6.2. 5 Taux des sures totaux dans les feuilles.....	111
6.3. Paramètres de physicochimiques.....	113
6.3. 1 Taux des sures dans les fruits .....	113
6.3. 2 Taux de vitamines « C » dans les fruits .....	114
6.3. 3 Taux d'acidité titrable dans les fruits .....	115
6.4. Les paramètres de rendements.....	116

6.4. 1 Nombre des fleurs par bouquet florale .....	117
6.4. 2 Nombre des fruits par bouquet florale .....	118
6.4. 3 calibre des fruits.....	119
6.4.4 Estimation de la fructification.....	120
6.4.5 Taux d'avortement.....	121
6.5. Taux d'absorption hydrominérale.....	121
6.6. Discussion générale.....	123
CONCLUSION.....	127
REFERENCES.....	129

## LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

### La liste des figures :

<b>Figure N°01</b> : Classement des principales productions mondiales de fruits.....	20
<b>Figure N°02</b> : Schéma de fonctionnement d'une culture hors sol.....	28
<b>Figure N°03</b> : Analyse minérale d'un modèle végétal .....	55
<b>Figure N°04</b> : Les grains de tomate mise en germination à 25°C dans les boites de Pétri.....	66
<b>Figure N°05</b> : Les graines de tomate mises en germination à l'intérieur de l'étuve (25°C).....	66
<b>Figure N°06</b> : Aspect général des grains de tomate après germination.....	67
<b>Figure N°07</b> : Aspect générales des jeunes plantules après le repiquage.....	67
<b>Figure N°08</b> : Stade végétatif en début de traitement.....	68
<b>Figure N°09</b> : Aspect général des conteneurs.....	68
<b>Figure N°10</b> : Dispositif expérimental.....	69
<b>Figure N°11</b> : Schéma du dispositif expérimental.....	70
<b>Figure N°12</b> : Aspect générale d'un réfractomètre et la manière de lecture.....	88
<b>Figure N°13</b> : Aspect générales des plants de tomates alimenté par les traitements salins corrigés comparés au standard (T <sub>4</sub> ).....	89
<b>Figure N°14</b> : Aspect générales des plants de tomates alimentés par les traitements salins naturels comparés au standard (T <sub>4</sub> ).....	89
<b>Figure N°15</b> : La comparaison entre les plantes irriguées par le traitement salin naturel et sa correction respectivement (T <sub>1</sub> -T <sub>1</sub> C), (T <sub>2</sub> -T <sub>2</sub> C) et (T <sub>3</sub> -T <sub>3</sub> C).....	90
<b>Figure N°16</b> : la vitesse de croissance des plantes (cm/jours).....	91
<b>Figure N°17</b> : Aspect général des fruits de tomates récoltés à partir des plants irrigués par des différentes traitements.....	111

## La liste des tableaux

<b>Tableau N°01</b> : Composition du fruit de tomate [g/100gMF].....	19
<b>Tableau N°02</b> : Production mondiale de la tomate en 2007.....	20
<b>Tableau N°03</b> : Evolution de la tomate maraichère en Algérie entre 2001-2009.....	20
<b>Tableau N°04</b> : Températures requises pour les différentes phases de développement d'un pied de tomate.....	22
<b>Tableau N°05</b> : les maladies de la culture de tomate, leurs traitements possibles et les conseils pratiques.....	25
<b>Tableau N°06</b> : la lutte biologique contre quelques ravageurs de la culture de tomate.....	26
<b>Tableau N°07</b> : Classes de la salinité du sol en fonction de la conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée et de la somme des anions.....	33
<b>Tableau N°08</b> : Dégradation des terres cultivées par la salinisation des divers pays au cours de la dernière décennie.....	34
<b>Tableau N°09</b> : classification des wilayat touchés par la salinité en fonction de la superficie affectée par les sels de la surface agricole utile.....	35
<b>Tableau N°10</b> : classification des sols salés et sodique.....	38
<b>Tableau N°11</b> : Moyennes des températures par semaine enregistrées sous serre ...	65
<b>Tableau N°12</b> : teneur des différents éléments minéraux contenus dans l'eau de Blida.....	71
<b>Tableau N°13</b> : Composition de l'eau de Blida.....	75
<b>Tableau N°14</b> : Eau de Blida corrigée T <sub>4</sub> (solution nutritive standard).....	75
<b>Tableau N°15</b> : Composition des solutions complémentaires d'oligo-éléments A et B .....	76
<b>Tableau N°16</b> : Eau d'oued Chélif naturelle, reconstituée avec l'eau de Blida T <sub>1</sub> .....	77
<b>Tableau N°17</b> : Eau d'oued Chélif corrigé, reconstituée avec l'eau de Blida T <sub>1</sub> C.....	78
<b>Tableau N°18</b> : Eau d'oued Chélif naturelle reconstituée avec l'eau Blida T <sub>2</sub> .....	79
<b>Tableau N°19</b> : Eau d'oued Chélif corrigé reconstituée avec l'eau Blida T <sub>2</sub> C.....	80
<b>Tableau N°20</b> : Eau d'oued Chélif naturelle reconstituée avec l'eau Blida T <sub>3</sub> .....	80
<b>Tableau N°21</b> : Eau d'oued Chélif corrigé reconstituée avec l'eau Blida T <sub>3</sub> C.....	81
<b>Tableau N°22</b> : Composition globale des solutions nutritives saline et corrigée en éléments minéraux (mg/ l).....	82

<b>Tableau N°23</b> : Doses et fréquence nécessaires pour la culture de tomate .....	83
<b>Tableau N°24</b> : Programme des traitements phytosanitaires réalisés.....	83
<b>Tableau N°25</b> : Hauteur moyenne des tiges en (cm).....	92
<b>Tableau N°26</b> : Diamètre des tiges.....	94
<b>Tableau N°27</b> : Nombre des feuilles.....	94
<b>Tableau N°28</b> : Biomasses fraîches totales.....	95
<b>Tableau N°29</b> : Biomasses fraîches des feuilles.....	96
<b>Tableau N°30</b> : Biomasses fraîches des tiges.....	97
<b>Tableau N°31</b> : Biomasses fraîches des racines.....	98
<b>Tableau N°32</b> : Longueur des racines.....	99
<b>Tableau N°33</b> : Biomasse sèche totale .....	100
<b>Tableau N°34</b> : Biomasse sèche des feuilles.....	101
<b>Tableau N°35</b> : Biomasse sèche des tiges.....	102
<b>Tableau N°36</b> : Biomasse sèche des racines .....	102
<b>Tableau N°37</b> : Matière sèche totale.....	103
<b>Tableau N°38</b> : Matière sèche des feuilles.....	104
<b>Tableau N°39</b> : Matière sèche des tiges.....	105
<b>Tableau N°40</b> : Taux du proline dans les différentes parties de la plantes .....	106
<b>Tableau N°41</b> : Taux de la chlorophylle (A) .....	108
<b>Tableau N°42</b> : Taux de la chlorophylle (B) .....	109
<b>Tableau N°43</b> : Taux de la chlorophylle (C) .....	110
<b>Tableau N°44</b> : Taux des sures totaux dans les feuilles.....	111
<b>Tableau N°45</b> : Quantité des sures dans les fruits .....	113
<b>Tableau N°46</b> : Taux de vitamines « C » dans les fruits .....	114
<b>Tableau N°47</b> : Taux d'acidité titrable dans les fruits .....	115
<b>Tableau N°48</b> : Nombre des fleurs par bouquet floral.....	116
<b>Tableau N°49</b> : Nombre de fruit par bouquet.....	117
<b>Tableau N°50</b> : Répartition des calibres en % du poids des fruits récoltés.....	118
<b>Tableau N°51</b> : Estimation de la fructification.....	119
<b>Tableau N°52</b> : Taux d'avortement [%] .....	120
<b>Tableau N°53</b> : Taux d'absorption hydrominérale (%).....	120

## La liste des abréviations :

% : pourcent

°C : degré de Celsius

CE : conductivité électrique

cm : centimètre

g : gramme

Ha : hectare

m : mètre

m<sup>3</sup>: mètre cube

meq : milliéquivalent

ml : millilitre

mmohs/cm : milimhos par centimètre

SAU : surface agricole utile

SAR : taux de sodium absorbé

T : tonne

µg/g MF : microgramme par gramme de la matière fraîche

TMV : virus mosaïque du tabac

MF : matière fraîche

MS : matière sèche

Qx : quintaux

Min : minimum

Max : maximum

Kg : kilogramme

CeC : capacité d'échange cationique

L : litre

mm : millimètre

pH : potentiel hydrogène

PSE : pourcentage d'échange de sodium

S/m : siemence par mètre

ARN : adénosine ribo nucléaire

P : probabilité

Ø : le diamètre

Σ : la somme

## INTRODUCTION

La salinité excessive affecte la rhizosphère et limite la répartition des plantes dans leur habitat naturel. Le fort ensoleillement et les rares pluies dans les régions semi-arides et arides qui représentent un tiers de la surface du globe, accentuent la salinisation des périmètres irrigués et les rendent impropres aux cultures [1].

Ce phénomène affecte près de 7% de la surface globale dans le monde. L'Algérie se situe parmi les pays touchés, presque 3,2 millions d'hectares de la surface sont salins [2].

A l'échelle de la plante entière, les ions chlorures, sodique, sulfates et magnésiens entrent par les racines, sont véhiculés par la sève xylémique jusqu'aux tiges et feuilles. Là, ils sont soit stockés (plantes inclusives), soit au contraire très peu retenus et mobilisés par la sève phloémique jusqu'aux racines (plantes exclusives).

La salinité diminue le potentiel osmotique de la solution du sol et réduit par conséquent l'absorption de l'eau par les racines. La turgescence cellulaire est abaissée ce qui entraîne un phénomène de plasmolyse. Certains végétaux régulent leur pression osmotique interne par la synthèse d'osmoprotecteurs, principalement des sucres solubles et acides aminés comme la proline et la glycinebétaine. La synthèse de proline est une mesure adaptative prise par les plantes et sa teneur est corrélée à la tolérance aux sels nocifs [3].

À l'échelle cellulaire, ce phénomène affecte l'ultra structure des chloroplastes on provoquant des perturbations et la perte de l'enveloppe chloroplastique [4].

Dans le cadre de cette approche et afin de porter une contribution à l'effet de la salinité sur le comportement éco physiologique de la tomate, nous nous sommes intéressés à l'étude des réponses de la variété (Saint-Pierre) soumise à un stress salin. Pour cela, nous avons procédé à des mesures biométriques, au dosage de quelques paramètres éco physiologiques des différents organes de la plante, et certains paramètres organoleptiques des fruits de tomate.

## Chapitre 01 : La culture de tomate

### 1.1. Généralités :

La tomate (***Solanum Lycopersicum***) est originaire des vallées fertiles du Mexique. Elle a d'abord été cultivée et améliorée par les indiens du Mexique, sous le nom aztèque « tomatl », avant d'être ramenée en Europe par les conquistadores. Neuf espèces sauvages peuvent être observées en Amérique du sud, dont seulement deux comestibles, la « tomate groseille » (***Solanum pimpinellifolium***) et la « tomate cerise » (***Solanum lycopersicum*** var ***cesariforme***) qui est l'ancêtre de nos tomates actuelles [5].

Parmi les dénominations on trouve : ***Solanum esculentum***, ***Solanum lycopersicum***, ***Lycopersicon lycopersicum*** ou ***Lycopersicum esculentum***. Les données génétiques, phylogénétiques, morphologiques et géographiques ont permis de confirmer l'appartenance de la tomate au genre ***Solanum***. En 2006 le nom de ***Solanum lycopersicum*** est définitivement accepté par la communauté scientifique [6].

Pour la première fois, Pietro Andrea Mattioli, botaniste et médecin italien, en donne une description sommaire dans un ouvrage publié en 1544 et Rembert Dodoens en fait la première représentation graphique en 1557 [6].

En Europe les italiens ont été les premiers à la consommer dès le 16ème siècle, notamment en sauce, et c'est sous cette forme qu'elle atteint la France par la Provence au 17ème siècle, avant d'être popularisée à Paris lors de la révolution [7]. La tomate a longtemps été considérée comme toxique, et on lui associait tous types de vertus maléfiques à cause de sa ressemblance avec la mandragore. Elle a donc d'abord été utilisée en tant que plante ornementale, puis en 1778, elle a rejoint le catalogue de semence potagère de Vilmorin-Andrieu [8].

Par la suite, la consommation de tomates a connu un essor au 19ème siècle lorsque les fruits et légumes dit « primeurs » [6].

Les premières recherches variétales débiteront au 20ème siècle, pour produire des tomates plus régulières, plus productives, et plus résistantes aux

maladies. Les modes de production évoluent également, la production de tomates sous serre toute l'année, notamment aux Pays-Bas prend de l'ampleur. Aux Etats-Unis par contre, les cultures restent davantage effectuées en plein champ de façon mécanisée [6].

### 1.2. Description botanique :

La tomate (**Solanum lycopersicum L.**) est une plante diploïde à  $2n=24$  chromosomes, qui appartient à l'ordre des **solanales** et à la famille des **solanacées**. C'est une plante herbacée, vivace à l'état naturel, et annuelle en culture [9].

### 1.3. Intérêt scientifique

La tomate est considérée comme une plante modèle pour l'étude du développement du fruit charnu. En effet, les processus de développement du fruit charnu et son mûrissement sont très différents d'un point de vue métabolique de ceux décrits chez l'autre plante modèle, **Arabidopsis thaliana** [10].

### 1.4. Avantages de la tomate :

[11], cite quelques avantages de la culture de tomate :

- ❖ C'est une culture potagère à cycle relativement court.
- ❖ L'on peut opter pour une période de production courte ou longue.
- ❖ La tomate peut être cultivée en plein champ et sous abri.
- ❖ La tomate s'incorpore bien dans différents systèmes de culture.
- ❖ La tomate a une valeur économique élevée.
- ❖ Le fruit de la tomate a une teneur élevée en oligo-éléments.
- ❖ Les fruits peuvent être transformés, séchés et mis en conserve.

L'essor de la biologie moléculaire au cours des 20 dernières années a mis en évidence des programmes génétiques et métaboliques spécifiques aux fruits charnus. En tant que plante d'intérêt agronomique, la tomate fait l'objet de nombreuses études et les ressources génétiques, moléculaires et biochimiques disponibles sont abondantes. En effet, les qualités organoleptiques du fruit de tomate sont directement liées aux caractères physiologiques et biochimiques de cet organe puits. La tomate est l'une des premières plantes supérieures utilisée pour l'établissement de cartes métabolique [12].

## 1.5. Classification :

[12], mentionnent qu'on compte plus de 1000 variétés à l'heure actuelle qu'on peut les classer en deux groupes : les variétés fixes et les hybrides.

**1.5.1. Les variétés fixes :** Dans cette catégorie on distingue deux groupes variétaux importants en fonction du développement de leur tige [14].

➤ **Les variétés à croissance indéterminée**

➤ **Les variétés à croissance déterminée**

**1.5.2. Les hybrides :** les hybrides  $F_1$  sont issus de l'hybridation de deux lignées homozygotes. Ses caractères résultent de la conjonction de l'information génétique fournie par chacun des deux parents [12].

## 1.6. Composition des feuilles et du fruit de tomates

### 1.6.1. Composition des feuilles

Les feuilles de tomates sont toxiques à cause des quantités importantes d'alcaloïdes qu'elles contiennent [15]. Ces composés sont intéressants pour la plante puisqu'ils interviennent dans la résistance contre certains pathogènes fongiques, comme le *Botrytis*, bactériens comme *Clavibacter michiganense* (agent du chancre bactérien), et viraux comme le virus de la mosaïque du tabac (TMV) [16]. Les feuilles de tomate contiennent également d'autres métabolites secondaires, comme les composés phénoliques qui sont impliqués dans la résistance des plantes contre certaines maladies [17]. Elles possèdent donc des pigments photosynthétiques : de la chlorophylle a et b et des caroténoïdes dont le bêta-carotène et la lutéïne [18]. Les teneurs en saccharide y sont relativement importantes, l'amidon et le saccharose étant majoritaires, mais des hexoses (fructose et glucose) sont également présents [19]. Elles contiennent également des acides organiques, les acides citrique et malique étant les plus abondants [20].

### 1.6.2. Composition des fruits

Les fruits de tomate sont majoritairement composés d'eau, environ 95%, et possèdent peu de lipides et protides, ce qui en fait un aliment peu calorique, 15 à 20 calories pour 100g.

**Tableau N°01:** Composition du fruit de tomate [g/100gMF].

	Variation	Minéraux	Variatio	Vitamines	Variation
<b>Eau</b>	93,4-95,2	Ca	9,7-15	Provitamine A	0,5-0,8
<b>Protides</b>	0,9-1,1	K	202-300	B1	0,04-0,06
<b>Lipides</b>	trace-0,3	Na	3-11	B2	0,02-0,05
<b>Glucide</b>	2,8-4,7	P	20-27	B6	0,08-0,1
<b>Fibres</b>	0,5-1,5	Fe	0,2-0,6	C	15-23
<b>Minéreau</b>	0,6	Mg	3-11	E	0,04-1,2
<b>Fibres</b>	1,2g			<b>Valeur</b>	19Kcal

Source: [21].

La matière sèche des fruits est principalement composée de sucres, environ 50% de la MS [22] (Figure 3). Le saccharose importé des feuilles, est hydrolysé dans les fruits en glucose et fructose. Le jeune fruit peut également stocker des sucres sous forme d'amidon qui sera dégradé au cours de la maturation. La cellulose et l'hémicellulose représente environ 10% de la MS et les acides organiques 13% [22]. L'acide citrique est l'acide le plus présent dans le fruit mûr de tomate, suivi de l'acide malique [23].

Les tomates possèdent également de nombreuses vitamines : A, B1, E et C, ainsi que des fibres (1.8g pour 100g MF), des acides aminés essentiels, des sels minéraux (potassium, chlore, magnésium, phosphore) et des oligoéléments (fer, zinc, cuivre, cobalt, bore, nickel, iode) (Tableau 1), ce qui en fait un aliment particulièrement recommandé par les diététiciens [24].

L'intérêt nutritionnel de la tomate réside également dans le fait que ce fruit contient de nombreux métabolites secondaires, et des antioxydants. En effet, la tomate contient des polyphénols, des flavonoïdes comme la rutine et des dérivés d'acides hydroxycinnamiques comme l'acide chlorogénique [25].

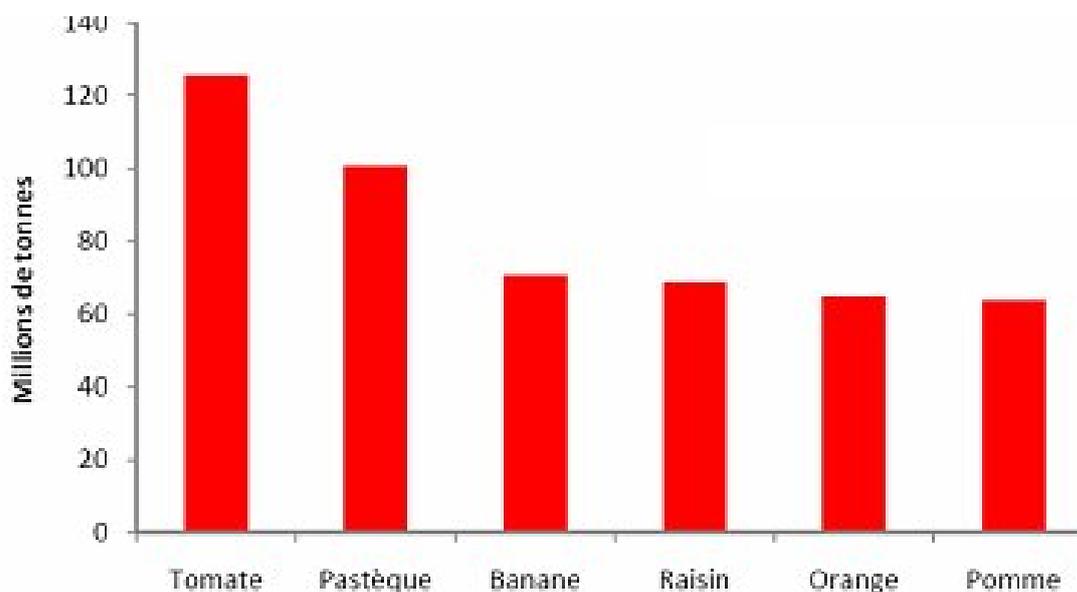
### 1.7. Importance économique et production mondiale actuelle

La tomate est la troisième espèce cultivée au monde, après la pomme de terre et la patate douce, et le deuxième légume le plus consommé [24]. Ce légume représente donc un enjeu économique, et est soumis à une concurrence importante.

**Tableau N°02** : Production mondiale de la tomate en 2007 [26].

Pays	Production (10 <sup>3</sup> tonnes)	(%)	Pays	Production (10 <sup>3</sup> tonnes)	(%)
<b>Monde</b>	<b>124 875</b>	<b>100%</b>	<b>Ouzbékist</b>	1 317	01,05%
<b>Chine</b>	31 644	25,34%	<b>Maroc</b>	1 206	00,96%
<b>USA</b>	11 043	08,84%	<b>Portugal</b>	1 085	00,86%
<b>Turquie</b>	10050	08,04%	<b>Nigeria</b>	1 057	00,84%
<b>Inde</b>	8 586	06,87%	<b>Algérie</b>	1 023	00,81%
<b>Egypte</b>	7 600	06,08%	<b>Syrie</b>	946	00,75%
<b>Italie</b>	7 187	05,75%	<b>Canada</b>	839	00,67%
<b>Iran</b>	4 781	03,82%	<b>Cuba</b>	803	00,64%
<b>Espagn</b>	4 651	03,72%	<b>France</b>	790	00,63%
<b>Brésil</b>	3 453	02,76%	<b>Japon</b>	758	00,60%
<b>Mexique</b>	2 800	02,24%	<b>Argentine</b>	660	00,52%
<b>Russie</b>	2 296	01,83%	<b>Hollande</b>	660	00,52%
<b>Grèce</b>	1 712	01,37%	<b>Roumani</b>	627	00,50%
<b>Ukraine</b>	1 472	01,17%	<b>Autres</b>	14869	12,06%
<b>Tunisie</b>	960	00,76%			

Selon le tableau 3, les deux premiers pays producteurs mondiaux sont la Chine avec 25,34 % suivie des Etats-Unis avec 08,84 %. Avec plus de 10 millions de tonnes de tomates produites chaque année, la Turquie occupe le troisième rang mondial. De nombreux pays tels que l’Egypte, L’Inde, l’Iran, le Brésil, le Maroc et la Grèce produisent également chaque année plus d’un million de tonnes de tomates. Enfin, des pays comme la France et les Pays-Bas ont une production plus modeste de quelques centaines de milliers de tonnes [27].

**Figure N° 01** : Classement des principales productions mondiales de fruits [28].

Cependant, ces chiffres ne tiennent compte que des fruits commercialisés et pour avoir un chiffre exact, il faudrait y ajouter les tomates issues des cultures vivrières, non négligeables dans certaines régions. A elle seule, la Chine représente un quart de la production mondiale avec 31,6 Mt en 2007. Viennent ensuite les Etats-Unis avec 11,2 Mt puis l'Inde avec 8,5 Mt suivi de nombreux pays méditerranéens comme la Turquie, l'Egypte ou l'Italie (tableau n°3).

### 1.8. Importance de la tomate en Algérie :

La culture de la tomate occupe une place prépondérante dans l'économie agricole algérienne. Près de 33 000 ha sont consacrés annuellement à la culture de tomate (maraîchère et industrielle), donnant une production moyenne de 11 millions de quintaux et des rendements moyens d'environ 311 Qx/ha. Ces derniers demeurent faibles et assez éloignés de ceux enregistrés dans d'autres pays du bassin méditerranéen (Tunisie, Maroc, Espagne, France, Italie) producteurs de tomate, où les rendements varient entre 350 Qx/ha à 1500 Qx/ha [26].

**Tableau N°03** : Evolution de la tomate maraîchère en Algérie entre 2001-2009

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Superficies Ha	16760	17820	18650	19432	21089	20436	20079	19655	20789
Productions Qx	3735340	4013640	4569330	5121950	5137280	5489336	5673134	5592491	6410343
Rendements Qx/Ha	222,87	225,20	245,00	263,60	243,60	268,60	282,50	284,50	308,40

Source: [26].

Les données du tableau n° 04 montrent une augmentation de la superficie et de la production due à la consommation élevée de ce légume notamment à compter de l'année 2004 qui se stabilisent aux alentours de 20000Ha avec une production moyenne de 5.570755Qx.

L'accroissement de la superficie de 15,94% a engendré une augmentation de la production de 37,12% par rapport à l'année 2001. Cette augmentation de la production n'est pas liée uniquement à l'augmentation des superficies mais aussi aux techniques utilisées dans le calendrier cultural et l'entretien de la culture qui se sont améliorées progressivement.

[26] indique que les principales contraintes de production de la tomate maraichère peuvent être résumées comme suit :

- Le faible encadrement et même l'absence par les vulgarisateurs dans certaines exploitations agricoles
- Faible utilisation des nouvelles techniques de production, semences sélectionnées, plants certifiés
- Non respect du calendrier cultural
- Absence de traitements préventifs contre les attaques parasitaires
- Faible taux de couverture des besoins en eau, alors que c'est une espèce exigeante en eau 4000 à 5000m<sup>3</sup>/Ha
- Circuit commercial mal organisé (offre excédentaire ou déficitaire selon les années, ce qui se répercute sur les prix)

## 1.9. Exigence de la culture de tomate

### 1.9.1. Le climat et le sol

#### 1.9.1.1. Température et lumière

La température est le facteur le plus déterminant dans la production de la tomate, elle demande un climat relativement frais et sec pour fournir une récolte abondante et de qualité. La température optimale pour la plupart des variétés se situe entre **21** et **24°C**. Les plantes peuvent surmonter un certain intervalle de températures, mais en-dessous de **10°C** et au-dessus de **38°C** les tissus des plantes seront endommagés [29].

**Tableau N°04** : Températures requises pour les différentes phases de développement d'un pied de tomate

Phases	Température (° C)		
	Min.	Intervalle optimale	Max.
Germination des graines	11	16-29	34
Croissance des semis	18	21-24	32
Mise à fruits	18	20-24	30
Développement de la couleur	10	20-24	30

Source: [30]

### **1.9.1.2. L'eau et l'humidité**

Une simple astuce permet de déterminer si les réserves en eau disponibles sont suffisantes pour cultiver la tomate. Le stress causé par une carence en eau et les longues périodes arides fait tomber les bourgeons et les fleurs [31].

Par contre, lorsque les averses sont très intenses et l'humidité est très élevée, la croissance des moisissures et la pourriture des fruits seront plus importants. Les temps nuageux ralentissent le mûrissage des tomates. Cependant, des cultivars adaptés sont disponibles [30].

#### **1.9.1.3. La lumière :**

La lumière est un facteur écologique essentiel pour la tomate, elle intervient dans des nombreux phénomènes physiologiques, notamment la photosynthèse [32].

Durant les 30 à 45 jours qui suivent le semis, les fortes intensités lumineuses favorisent le raccourcissement de l'axe et l'induction des 1ers bouquets surtout à des températures basses [33]. Par contre, un manque de lumière peut inhiber cette induction [31].

#### **1.9.1.4. Le sol**

Elle préfère les terres limoneuses profondes et bien drainées. La couche superficielle du terrain doit être perméable. Une profondeur de sol de 15 à 20 cm est favorable à la bonne croissance d'une culture saine [34].

La tomate tolère modérément un large intervalle de valeurs du pH (niveau d'acidité), mais pousse le mieux dans des sols où la valeur du pH varie entre 5,5 et 6,8 et où l'approvisionnement en éléments nutritifs est adéquat et suffisant [11].

#### **1.9.1.5. La salinité**

La culture de la tomate tolère une conductivité électrique (CE) de l'ordre de 3 à 4,5 mmhos/cm). L'impact de la salinité est plus grave sur le rendement suite à la réduction du calibre du fruit. Donc elle doit être maintenue entre 1 et 2 mmhos/cm à 25°C en fonction du stade de la culture et de la saison [34].

### **1.9.2. Nutrition minérale:**

La tomate se classe parmi les espèces exigeantes en éléments fertilisants .Les doses d'engrais minéraux doivent être déterminé en fonction de la richesse du sol et le stade de développement [31]. Le démarrage de la croissance de la plante est meilleur lorsqu'elle trouve des matières nutritives dans la rhizosphère [29].

Le potassium représente le principal constituant minéral de fruit, il constitue l'élément majeur dans un plan de fumure de la tomate sous serre [33].

## **1.10. Opérations d'entretiens :**

### **1.10.1. Taille**

La taille permet d'améliorer l'interception de la lumière ainsi que la circulation de l'air. La taille des gourmands (l'ébourgeonnage) et des extrémités des tiges (l'écimage) se fait par pinçage [11].

### **1.10.2. Ébourgeonnage**

Il est important de pincer les gourmands. L'on élimine les petites pousses latérales pour ne laisser qu'une tige principale. Les grappes de fruits pousseront le long de cette tige principale. Le fait de tailler les gourmands améliore la qualité et la taille des fruits [34].

### **1.10.3. Effeillage**

Il faut enlever les feuilles anciennes, jaunies ou malades des pieds de tomate. Ceci permet de réprimer le développement et la propagation des maladies [11].

## **1.11. Maladies et moyennes de lutte de la tomate :**

### **1.11.1. Les maladies :**

La tomate est sensible à différentes moisissures, bactéries et virus. Les moisissures et les bactéries provoquent des maladies au niveau des feuilles, des fruits ou des racines. Une infection virale provoque souvent une croissance retardée et une diminution au niveau de la production. Les dommages causés par les maladies peuvent conduire à une réduction considérable de la récolte [11].

Le nombre d'agents pathogènes (bactéries, virus, champignons) qui l'affectent cette espèce est très élevée. Ce sont plus de 200 maladies qui ont été décrites sur la tomate au niveau mondial. Ces maladies peuvent être localisées au niveau des folioles, les racines, le collet, la tige, et au niveau des fruits.

Le tableau 06 résume les maladies essentielles qui touchent la culture de tomate, leurs agents causals, les symptômes ainsi que les traitements possibles.

**Le tableau 05** : les maladies de la culture de tomate, leurs traitements possibles et les conseils pratiques

<b>Maladie foliaire</b>	<b>Agent causal</b>	<b>Conditions favorables, symptômes et dégâts</b>	<b>Traitements recommandés &amp; autres conseils pratiques</b>
<b>Le mildiou</b>	<i>Phytophthora infestans</i>	Se propage rapidement dans un environnement froid et humide, et peut détruire toute la culture.	Environ 58 produits sont homologués pour la tomate. Utilisez les produits à base du Manèbe, Zinèbe, Chlorothalonil, Oxychlorure de cuivre, Hydroxyde de cuivre, Mancozèbe
<b>Brûlure alternarienne (Alternariose)</b>	<i>Alternaria solani</i>	Se rencontre dans les climats froids et pluvieux.	Utilisez les variétés résistantes et une rotation culturale adéquate. Lutte chimique possible, mais elle doit être complétée par une désinfection des graines et l'élimination par brûlis des débris où peut se conserver le champignon.
<b>Botrytis (Moisissure grise)</b>	<i>Botrytis cinerea</i>	Apparition des taches brunâtres accompagnées d'un duvet grisâtre sur feuillage et tige. Pourriture molle grise sur fruits et chute des fleurs et fruits.	Détruisez les débris végétaux, Utilisez les variétés résistantes, éviter l'excès d'eau, éviter l'excès d'azote. Traitement chimique possible. En préventif, alterner les produits de la famille Benzimidazoles et les Dicarboximides.
<b>Chancre bactérien</b>	<i>Clavibacter michiganensis ssp michiganensis</i>	Flétrissement des feuilles, suivi d'un dessèchement total. Sur fruit, se forment des taches blanchâtres, dont le centre brunit et s'entoure d'un halo jaune clair, d'où le nom de "œil"	Ne pratiquez la tomate que sur les terrains où cette maladie n'a pas été enregistrée.
<b>Gale bactérienne</b>	<i>Xantomonas vesicatoria</i>	Taches brunâtres relativement régulières entourées d'un halo jaune ce qui entraîne le dessèchement de folioles et la chute des feuilles. Apparition de petits Chancres pustuleux sur fruit.	Utilisez les semences certifiées.
<b>Moelle noire</b>	<i>Pseudomonas corugata</i>	Taches sombres sur tige, pétioles et pédoncules. Les vaisseaux demeurent intacts, contrairement à ce qui se passe dans le cas d'une maladie vasculaire.	Utilisez les variétés résistantes.

Source : [35].

### 1.12. Protection intégrée de la tomate :

La lutte intégrée est un système de répression des ravageurs qui emploie toutes les techniques et méthodes appropriées de façon aussi compatible que possible et qui maintient la population des ravageurs à des niveaux tels qu'il n'y a pas de dommages économiques [11].

Elle se base sur les principes écologiques et respecte la santé humaine et l'environnement. Plusieurs programmes ont été développés par l'introduction d'auxiliaires ou ennemis naturels et des résultats spectaculaires ont été obtenus et menés avec succès comme s'est indiqué ci-après :

**Le tableau N°06** : la lutte biologique contre quelques ravageurs de la culture de tomate

Ravageurs	Ennemis naturels ou auxiliaires
Tétranyque tisserand ( <i>Tetranychus urticae</i> )	Acarien prédateur <i>Phytoseiulus persimilis</i>
Aleurode des serres ( <i>Trialeurodes</i> )	Hyménoptère parasitoïde <i>Encarsia formosa</i>
Thrips de Californie ( <i>Frankliniella occidentalis</i> )	Acariens prédateurs <i>Amblyseis cucumeris</i> et <i>A. barkeri</i>
Mouches mineuses ( <i>Liriomyza bryonii</i> , <i>L. trifolii</i> , <i>L. huidobrensis</i> )	Hyménoptères parasitoïdes <i>Dacnusa sibirica</i> (endoparasite) et <i>Diglyphus isaea</i>
Pucerons verts du pêcher et <i>Macrosiphum euphorbiae</i>	Hyménoptère parasitoïde <i>Aphydius matricariae</i> ou Cécidomyie <i>Aphydioletes</i>
Pucerons, thrips et tétranyques tisserands	Punaise orédatrice polyphage <i>Orius spp</i>
Pucerons lanigères et pucerons du coton ( <i>Aphis gossypii</i> )	Coléoptère <i>Cryptolaemus montrouzieri</i>
Pucerons, mouches blanches et acariens prédateurs	<i>Chrysopa carnea</i>

Source: [26].

## **Chapitre 02: La culture hydroponique**

### **2.1. Généralités :**

Pour que les végétaux poussent de manière optimale, ils ont besoin de lumière (qu'elle soit naturelle ou artificielle), d'une température stable et tempérée, d'une hygrométrie de l'air suffisante ainsi que d'une oxygénation satisfaisante des racines, enfin, d'une nourriture adéquate en suffisance composée d'eau, de sels minéraux et d'oligo-éléments [36].

Dans la nature, c'est le sol qui joue le rôle de réservoir de sels nutritifs. Il est cependant très rare d'avoir un sol de qualité qui possède tous les éléments nécessaires à la vie des végétaux dans des proportions optimales [37].

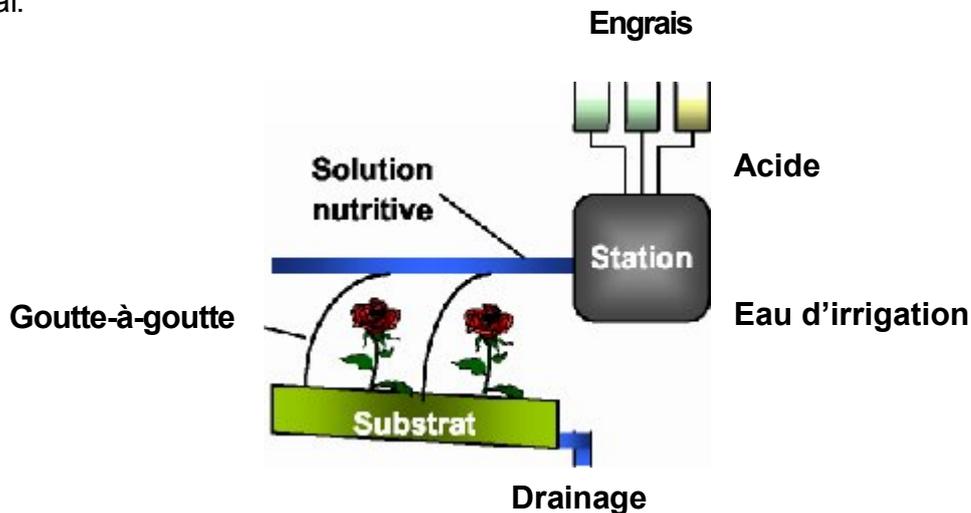
La culture hors-sol est une nouvelle technique alternative de culture des végétaux qui peut être mise en place, dans des exploitations horticoles de toutes tailles. Pouvant constituer, semble-t-il, une réponse aux problèmes d'eau et de pollution que connaît notre planète, être au service des chercheurs qui utilisent cette technologie pour faire des recherches sur les végétaux, que ce soit pour les plantes médicinales ou encore pour les micro-organismes embarqués dans les vaisseaux spatiaux [36].

Aujourd'hui, la culture hors-sol est pratiquée en agriculture sur des millions d'hectares dans le monde. Un grand nombre des légumes frais comme la tomate, le concombre, la courgette, la laitue, le poivron, les piments, les épinards, les brocolis, les haricots, les carottes, les betteraves, les pommes de terre, les herbes aromatiques, qui sont cultivés en serre sont issus de cultures hors-sol, et, c'est également le cas de la majorité des fleurs coupées que l'on retrouve chez les fleuristes [37].

### **2.2. Définition :**

Les cultures hors sol ou sans sol se définissent comme des cultures de végétaux effectuant leur cycle complet de production sans que leur système racinaire ait été en contact avec leur environnement naturel, le sol. Dans ce type de système, les racines des végétaux sont alimentés par un milieu liquide minéral appelé solution nutritive, qui apporte l'eau, l'oxygène et les éléments minéraux indispensables au développement de la plante [37].

L'alimentation est assurée par percolation d'un milieu liquide minéral, la solution nutritive qui apporte l'eau, l'oxygène dissous, et les éléments minéraux indispensables. Cette solution nutritive est le résultat de l'enrichissement de l'eau du réseau par des engrais solubles en respectant des équilibres ioniques définis, propres aux besoins du végétal.



**FigureN°02** : Schéma de fonctionnement d'une culture hors sol [38].

C'est l'une des technologies modernes utilisées aujourd'hui en horticulture pour valoriser les terrains à problèmes, où une meilleure productivité est impossible autrement qu'avec un substrat de culture artificiel. C'est l'unique solution lorsque le sol naturel souffre de contraintes incorrigibles (terrain rocailleux, hydromorphes, salés,...), alors que tous les autres facteurs (climat, disponibilité et qualité de l'eau, proximité et prix du marché,...) sont favorables [39].

Cette technologie de production végétale caractérisée par une alimentation minérale des racines (aéroponie, nutriments film technique « NFT ») ne nécessite pas parfois de support solide. Si, par contre, un support est utilisé, celui-ci est qualifié du terme général de « substrat » [36].

### **2.3. Les atouts des cultures hors sol**

Par rapport aux cultures sur sol, les cultures hors sol sous serre présentent certains avantages qui expliquent leur développement actuel.

#### **2.3.1. Elimination de problèmes liés au sol**

La principale raison historique du développement des cultures hors sol provient de la nécessité d'éliminer certains problèmes liés au sol.

### ❑ **Sols contaminés par des agents pathogènes**

L'intensification de l'horticulture conduit généralement à la monoculture. Cette absence de rotation favorise la contamination du sol par les agents pathogènes. Ils trouvent sous la serre le microclimat chaud et humide favorable à leur propagation.

### ❑ **Sols à salinité élevée**

Des apports d'engrais excessifs peuvent entraîner une élévation de la salinité des sols.

Le microclimat de la serre aggrave ce phénomène en occasionnant des remontées des sels. L'augmentation de la concentration saline pose alors de graves problèmes cultureux.

### ❑ **Mauvaise qualité ou absence de sol**

Certains sols présentent de mauvaises potentialités agronomiques : qualité médiocre, faible profondeur ou amendement difficile. Dans ces cas de figure, le recours à la culture hors sol s'avère évident [38].

#### **2.3.2. Economie d'eau et d'engrais minéraux**

Les cultures hors sol conduisent à une meilleure maîtrise des apports, localisés, d'eau et d'éléments minéraux. En Hollande, les pertes d'azote par lessivage, en sol sous abri représentaient 1500 kg/ha/an. Pour la même culture conduite en hors sol, la perte d'azote n'était plus que de 400 kg /ha/an [40].

#### **2.3.3. Simplification des techniques culturales**

❑ Elimination de certaines façons superficielles, en particulier celles qui sont en relation avec l'utilisation d'un sol : préparation, binages, désherbage.

❑ Remplacement des étapes de fertilisation et d'irrigation par l'apport de la seule solution nutritive.

#### **2.3.4. Gain de précocité**

La culture hors sol favorise la précocité d'une culture sous serre. Le gain de précocité est estimé pour une culture de tomate de 4 à 7 jours (Sud de la France : [41]), à 10 jours (Belgique : [42]), jusqu'à 3 semaines - 1 mois (Bretagne).

### 2.3.5. Produits de meilleure qualité commerciale

Bien que le concept de qualité soit difficile à préciser et à quantifier, la culture hors sol a une influence favorable sur deux critères.

#### ▣ *L'aspect extérieur des fruits et légumes*

Les produits récoltés sont plus attrayants pour le consommateur. Ils ne sont pas souillés par la terre et n'ont donc pas besoin d'être lavés. La cuticule cireuse conserve ainsi son aspect brillant

#### ▣ *La diminution des résidus de pesticides*

Les cultures hors sol reçoivent moins de traitements phytosanitaires.

### 2.3.6. Augmentation de rendements

Les rendements obtenus par cette technologie sont nettement supérieurs à ceux obtenus en sol classique.

Devant ce nombre important d'avantages, les inconvénients sont moindres mais très importants. On peut noter :

- ✓ Le coût d'installation élevé car plus le système perfectionné et automatisé, plus il revient cher ;
- ✓ Compétence dans le domaine de la physiologie végétale et la chimie.

## **Chapitre 03 :**

### **Salinité des sols et des eaux d'irrigation**

#### **3.1. Généralités :**

La salinisation fragilise le sol et favorise l'installation d'une contrainte saline de plus en plus accentuée ce qui favorise l'apparition des problèmes environnementaux liés aux pratiques d'irrigation non contrôlées des terres cultivées [43]. Dans les zones arides et semi-arides, l'eau est le principal facteur limitant la production agricole. Le développement de l'agriculture dans ces régions fait recours à l'irrigation qui devient alors une nécessité pour produire suffisamment afin d'assurer les besoins alimentaires d'une population de plus en plus importante.

Selon [44], 35 à 40 % de la nourriture produite au monde provient des 15% des terres arables cultivées en irrigué.

Cependant, l'irrigation non contrôlée engendre des dégradations importantes de la qualité des sols et des eaux. En effet, aussi bien la quantité d'eau disponible que sa qualité affecte fondamentalement le sol et les cultures qui y sont cultivés. La présence des sels solubles dans l'eau d'irrigation et le pouvoir évaporateur de l'air dans les zones irriguées conduisent souvent à la salinisation des sols irrigués et particulièrement en zones arides et semi-arides [44].

#### **3.2. Notion de la salinité:**

La salinisation est le processus par le lequel les sels solubles s'accumulent dans le sol et elle a été identifiée comme un processus majeur de la dégradation des terres. Les causes techniques les plus importantes à l'origine de la diminution de la production sur de nombreux périmètres irrigués, particulièrement dans les zones arides et semi-arides. Il est estimé, à partir de diverses données disponibles que : Le monde perd au moins 3 ha de terres arables chaque minute à cause de la salinité du sol [45].

Pour les chimistes, un sel est le produit qui résulte de l'action d'un acide sur une base. Pour l'agronome, un sel est une substance dont la solubilité dans l'eau est suffisante pour gêner la croissance des plantes [46].

La salinité est la quantité globale des sels solubles contenus dans la solution du sol, c'est-à-dire la concentration saline de l'eau circulant sans distribution de matières ou de quantité de divers sels [47].

La salinité est évaluée par la conductivité électrique (CE) de l'extrait de pâte saturée qui est exprimée en mmhos/cm à 25°C. Néanmoins d'autres grandeurs sont utilisées pour caractériser les sols salés :

➤ La quantité de sodium absorbée (SAR) est une fonction de la proportion des charges électrique dues aux cations ( $\text{Na}^+$ ) par rapport à celles dues aux cations ( $\text{Ca}^{++}$ ).

[48], confirme qu'à l'aide du SAR, on divise les eaux d'irrigation en quatre classes. La classification est basée principalement sur l'effet du sodium sur les conditions physiques du sol.

**Classe S1:**  $\text{SAR} \leq 10 \rightarrow$  bas taux de sodium

**Classe S2 :** SAR 10,1 à 18  $\rightarrow$  taux moyen de sodium

**Classe S3 :** SAR de 18,1 à 26  $\rightarrow$  haut taux de sodium

**Classe S4 :**  $\text{SAR} \geq 26,1 \rightarrow$  très haut taux de sodium

**Classe S1:** l'eau peut être utilisée sur pratiquement n'importe quel type de sol avec un risque minimal d'accumuler du sodium à un niveau dommageable.

**Classe S2 :** l'eau présente un danger appréciable d'accumuler du sodium à un niveau dommageable pour les sols ayant une texture fine et une capacité d'échange cationique (CEC) élevée. Par contre, l'eau peut être utilisée dans les sols sableux ayant une bonne perméabilité.

**Classe S3 :** peut produire des niveaux dommageables de sodium dans pratiquement tous les types de sols. L'utilisation d'amendements tels que le gypse pourraient être nécessaires pour échanger les ions sodium. De plus, les pratiques culturales augmentant le drainage seront requises plus fréquemment.

**Classe S4 :** cette eau est généralement inadéquate pour l'irrigation.

Les sols dont l'évolution est dominée par l'existence de teneur notable des sels solubles ou par une fixation abondante de sodium (Na) sur le complexe absorbant du sol sont dits sols salés.

Les sols salés se rencontrent sous les climats à faible pluviosité et à forte évaporation (zones arides et semi arides). Ils sont fréquents aussi bien dans les zones côtières et dans les régions où la roche mère est saline (Polders, Marais, Estuaire) [49].

Les sols salés peuvent être classés en différentes classes de salinité en fonction de la conductivité électrique (CE) de l'extrait de la pâte saturée (tableau 1).

**Tableau N°07** : Classes de la salinité du sol en fonction de la conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée et de la somme des anions

Classes	Désignation	CE mmho/cm à 25°C	Somme des anions (meq/l)
0	Non salé	< 2,5	< 2,5
1	Faiblement salé	2,5 – 5	25 – 50
2	Moyennement salé	5 – 10	50 – 105
3	Salé	10 – 15	105 – 165
4	Fortement salé	15 – 20	165 – 225
5	Très fortement salé	20 – 27,5	225 -315
6	Excessivement Salé	27,5 – 40	315- 620
7	Hyper salé	> 40	> 620

Source : [50].

Un sol salé est caractérisé par :

- La formation d'une couche saline blanchâtre à la surface,
- La formation des points et tries de couleurs blanches sur le sol même en absence de croûte en surface,
- Une structure poudreuse et observable dans les premiers centimètres,
- Une certaine richesse en carbonate de calcium,

Les cultures sur ces sols présentent une croissance irrégulière et un manque de vigueur.

### 3.3. La salinité dans le monde :

On a estimé que 7% de la superficie mondiale des terres (920 millions d'ha) étaient plus ou moins salins, 3% (400 millions d'ha) présentant un caractère salin ou

sodique dominant. La salinisation des sols touche d'abord les régions arides. L'évapotranspiration y est en effet beaucoup plus forte que les précipitations pendant une bonne partie de l'année [43].

Selon [51], 10 millions d'hectares des terres irriguées sont perdus chaque année pour la culture par suite d'une salinisation excessive 10 à 15 % des surfaces irriguées soit 20 à 30 millions d'hectares souffrent à des degrés divers de problèmes de salinisation ; près de la moitié de toutes les surfaces irriguées sont menacées à long terme.

**Tableau N°08** : Dégradation des terres cultivées par la salinisation des divers pays au cours de la dernière décennie.

<b>Pays</b>	<b>Surfaces irriguées en 10<sup>3</sup> ha</b>	<b>Accroissement (en %)</b>	<b>% atteint par le sel</b>
<b>Egypte</b>	2474	-12	40
<b>Soudan</b>	1700	-2	20
<b>Etats unis</b>	19830	19	25
<b>Chine</b>	45420	6	15
<b>Inde</b>	39800	18	27
<b>Iran</b>	5730	-3	30
<b>Irak</b>	1750	11	50
<b>Pakistan</b>	15320	13	40

Source : [43].

#### **3.4. Répartition des sols salés en Algérie :**

En Algérie, les travaux de recherche de [52], montrent que la majorité des sols agricoles sont affectés par les sels, surtout dans les régions arides et semi arides.

**Tableau N°09** : classification des wilayat touchés par la salinité en fonction de la superficie affectée par les sels de la surface agricole utile

WILAYAT	SAU (ha)	Surface agricole affectée par la salinité (ha)	% de la SAU affecté par la salinité	WILAYAT	SAU (ha)	Surface agricole affectée par la salinité (ha)	% de la SAU affecté par la salinité
Tamanrasset	2510	1445	57.57	Alger	7940	150	1.89
Ouargla	17390	9850	56.64	Mostaganem	131730	1977	1.50
Ghardaïa	7930	3284	41.41	Naama	415	62	1.49
Bechar	13250	2249	16.97	Laghouat	53880	800	1.48
Illizi	570	60	10.53	Batna	487740	5100	1.05
Djelfa	67760	6250	9.22	Oran	85860	850	0.99
Relizane	641670	20000	8.28	Cheliff	188620	1490	0.79
Ain temouchent	18350	15000	8.14	Guelma	183860	1283	0.7
Tbessa	231750	13000	5.61	Mila	22150	100	0.45
Adrar	14990	780	5.20	Boumerdes	72090	192	0.27
Biskra	151530	7272	4.8	Saida	306480	700	0.23
khanchela	177900	4480	2.52	Tipaza	315340	472	0.08
Mascara	328740	6475	1.97				

Source : [53].

### **3.5. Les différents types de salinisation**

#### **3.5.1. La salinisation primaire :**

Selon [43], 80% des terres salinisées ont une origine naturelle. On parle alors de salinisation "primaire", due aux sels se formant lors de l'altération des roches ou à des apports naturels externes.

La migration et le dépôt des sels solubles dépendent de l'intensité et de la répartition de précipitations, du degré de porosité du sol et autres caractéristiques du milieu naturel [51].

#### **3.5.2. Origine de la salinisation primaire :**

Deux principales origines de salinisation sont rencontrées :

##### **3.5.2.1. Origine géologique :**

La salinité de l'eau souterraine peut varier de moins de 5g/l à plus de 100g/l avec prédominance des carbonates dans les solutions faiblement concentrés, les sulfates dans les solutions à concentration moyenne et les chlorures dans les solutions fortement concentrées [47].

Les sels fossiles sont l'origine principale de la salinisation primaire observée à travers le globe, tout simplement elle correspond à la solubilisation des sels initialement contenus dans les couches géologiques en particulier [54].

##### **3.5.2.2. Origine marine :**

En milieu méditerranéen la salinisation est d'origine lagunaire. Les zones salées sont des basses plaines soumises à l'action de la nappe phréatique. La présence d'eau fortement minéralisée à faible profondeur et le climat évaporant, permettant les remontées capillaires [54].

Les mêmes auteurs indiquent que dans les régions situées à proximité de la mer ou des lacs. L'eau de mer a une influence directe ou indirecte sur les sols et les eaux souterraines, avec pour cette dernière des concentrations de 25 à 100 g/l de sels principalement des chlorures de sodium.

### 3.5.3. La salinisation secondaire :

Elle est induite par l'activité humaine et fréquemment liée à des pratiques agricoles [51].

La salinisation secondaire est généralement à l'origine de la diminution de la productivité de la terre car la forte concentration de sel dans le sol s'oppose à la bonne production, par conséquent, les terres cultivées affectées par Na Cl perdent progressivement leurs fertilités. S

Selon [43], 20% des terres salinisées, soit près de 15 Mha sur le continent Africain, ont une origine "anthropique".

Dans les sols irrigués, elle s'explique par irrigation avec une eau de mauvaise qualité, un lessivage insuffisant, un drainage déficient, des infiltrations à partir des canaux et des zones adjacentes, la présence d'un niveau phréatique élevé et un taux d'évapotranspiration importante. Donc elle est souvent due à l'irrigation, soit que le plan phréatique remonte au-dessus du seuil minimum, soit que l'on ait mal utilisé une eau saline [13].

A l'échelle globale, la salinité des sols n'est pas un problème spécifique d'une région ou d'un climat donné ; au contraire, si on observe la répartition des sols salins on constate que l'effet de la contrainte saline affecte toutes les régions du monde. Le problème des sols salins ne concerne pas les zones arides, sèche, essentiellement mais on peut estimer environs 160 million d'ha des terres irriguées (ce qui représente 1/3) des surfaces affectées [43].

La salinisation secondaire est la voie la plus importante et la plus rapide, quelques années à quelques centaines d'années. Elle correspond aux apports anthropiques directes tels que les apports de sel utilisés comme fertilisants (KCl,  $(NH_4)_2$ ,  $SO_4$ ) ou indirecte par certaines composées azotés ou soufrés retombant sous forme saline et surtout pour le biais d'apport d'eau d'irrigation déjà légèrement salées [54].

La salinisation des terres irriguées avec les eaux salées, contaminées par des invasions d'eau de mer (exemple : Tipaza) due a une surexploitation des nappes aquifères, à proximité du littoral [47].

Ainsi, l'utilisation irrationnelle et anarchique des engrais par l'agriculteur influe d'une façon indirecte sur l'accumulation des sels dans le sol.

### 3.6. Classification des sols salins

Ils sont classés en fonction de leur degré de salinité et/ou d'alcalinité et des caractéristiques de leur profil selon deux paramètres:

- **La conductivité électrique de la solution du sol:** "CE en  $S.m^{-1}$  : détecte les problèmes osmotiques
- **Le pourcentage d'échange de sodium:** "PES : indicatif des problèmes de dispersion physique

**Tableau N°10 :** classification des sols salés et sodiques.

Type de sol	Types de sels	CE	PSE	pH	Caractéristiques
<b>Salin</b>	Présence de sels solubles neutres; de chlorure et de sulfate de calcium, de magnésium, de potassium et de sodium (calcium et magnésium dominants)	$> 4dS/m$	$< 15\%$	$< 8.5$	La croissance des plantes est contrainte par une faible infiltration, une faible stabilité et aération du sol.
<b>Salin-sodique</b>	Grande concentration de sels neutres et d'ions sodium	$> 4dS/m$	$> 15\%$	$< 8.5$	La croissance des plantes sur ce type de sol peut être affectée à la fois par des excès de sel et par des excès de sodium.
<b>Sodique</b>	Faibles quantités de sels solubles neutres, grande quantité d'ions sodium	$< 4dS/m$	$> 15\%$	$> 8.5$	Ce type de sol est le plus affecté par les sels et le plus dégradé. Ce type de sol est dit <i>engorgé</i> .

Source : [43].

### 3.7. Les causes de la salinité :

Les rares précipitations, l'évaporation élevée, l'irrigation avec de l'eau saline, et les pratiques culturelles sont parmi les facteurs principaux qui contribuent à la salinité croissante. La salinisation secondaire, en particulier, aggrave le problème une fois que les superficies agricoles productives deviennent impropres à la culture due à la qualité médiocre de l'eau d'irrigation [55].

La salinité excessive affecte la rhizosphère et limite la répartition des plantes dans leur habitat naturel. Le fort éclaircissement et les rares pluies dans les régions semi-

arides et arides accentuent la salinisation des périmètres irrigués et les rendent impropres aux cultures [1].

L'eau saline occupe 71% de la surface de la terre. Environ la moitié des systèmes d'irrigation existant du monde sont sous l'influence de la salinisation. De tels sols défavorables aussi que la faible fertilité sont généralement peu convenables pour la production agricole, entraînant la réduction inacceptable de rendement. En raison du besoin accru de distribution de production alimentaire et d'augmentation des sols affectés par salinité, la recherche sur des réponses des plantes à la salinité a rapidement augmenté en quelques dernières décennies [56].

Le phénomène d'invasion marine, qui peut s'étendre sur plusieurs kilomètres à l'intérieur des terres est d'un grand risque pour les régions côtières tributaires des eaux souterraines pour leur approvisionnement en eau. Sous certaines conditions, l'eau salée se propage à l'intérieur des terres et contamine les eaux de la nappe située à proximité de la mer. Par ailleurs, l'invasion des eaux douces par les eaux salées aura pour effet une dégradation des sols et une salinisation par suite des irrigations avec ces eaux [57].

En Algérie, ce problème s'est peu posé dans le passé mais durant les dernières années, on a décelé des intrusions des eaux marines dans les nappes côtières d'Annaba et d'Oran (phénomène analogue au niveau de la sebkha). L'exploitation intensive et anarchique des nappes par l'agriculture a créé localement des problèmes de pollution et de dégradation du sol [58].

[59], montre que la salinité des sols peut avoir pour causes :

- ❖ L'existence d'un mauvais drainage est une condition essentielle de la salinisation. Ainsi, dans les régions arides et semi aride ; l'inexistante du drainage et du transport des sels solubles en plus de l'évaporation intense favorise la concentration des sels dans le sol.
- ❖ Dans la zone côtière, les apports marins et éoliens ont une influence directe et indirecte sur les sols et les eaux souterraines.
- ❖ Une irrigation sur sol non drainant utilisant une eau légèrement saline (accumulation des sels dans les sols).

- ❖ L'utilisation anarchique des engrais par l'agriculteur influe sur l'accumulation des sels dans le sol
- ❖ L'irrigation par des eaux salines.
- ❖ La remontée des nappes dès que la hauteur de la nappe se trouve à 1à2 mètre de la surface du sol, elle peut contribues activement à l'évaporation du sol et ainsi à la salinisation de la zone racinaire des cultures par accumulation des sels [60].

### **3.8. Les conséquences de la salinité :**

#### **3.8.1. Effet des sels sur le sol:**

C'est par leurs cations que les sels solubles modifiant la structure des sols à la suite de phénomènes d'échange [61].

L'augmentation du taux de sodium dans le sol et avec une intensité de pluie simulée de 26mm/ha provoque une forte réduction du taux d'infiltration final jusqu'à des volumes inférieurs à 1mm /ha [62].

Selon [63], pour une forte concentration des sels, le sodium se répartit avec le calcium dans les sites inter foliaire et augmente le gonflement et la rétention en eau des argiles.

#### **3.8.2. Effet des sels sur les plantes :**

Le stress salin a un triple effet sur la plante:

- Il réduit leur potentiel hydrique,
- Il cause un déséquilibre ionique ou des perturbations en homéostasie ionique,
- Il provoque une toxicité ionique.

Cet état hydrique altéré conduit à une croissance réduite et à la limitation de la productivité végétale. Depuis que le stress salin implique aussi bien le stress osmotique qu'ionique [64], l'arrêt de la croissance est directement relié à la concentration des sels solubles ou au potentiel osmotique de l'eau du sol.

La salinité est un facteur environnemental très important qui limite la croissance et la productivité [65].

Durant le début et le développement du stress salin à l'intérieur de la plante, tous les processus majeurs tels que : la photosynthèse, la synthèse des protéines, le métabolisme énergétiques... sont affectés. La première réponse est la réduction de la vitesse d'extension de la surface foliaire, suivi par l'arrêt de l'extension avec l'intensification du stress [64].

### **3.8.3. Action sur les phénomènes physiologiques :**

Lorsque les racines sont soumises à une forte salinité momentanée, elles provoquent la fermeture des stomates au niveau des feuilles qui constitue la première conséquence d'un défaut d'arrosage ou d'un apport excessif d'éléments minéraux. Si la salinité persiste, elle conduit à une diminution de la taille des organes [59]. En plus, à partir d'un certain seuil, les plantes soumises à l'action des chlorures portent des brûlures marginales sur les limbes et se défolient [66].

### **3.8.4. Action sur l'absorption hydrominérale :**

Lorsque la pression osmotique du milieu externe (solution du sol) est égale ou dépasse celle du suc cellulaire des racines, l'alimentation en eau devient impossible et les diverses fonctions physiologiques sont bloquées et le végétal s'arrête de croître et flétrit [66]. Ainsi, les travaux de [60], ont en évidence l'effet indirect de la pression excessive d'ions sodique, chlorique et borique sur l'absorption des ions ferreux, phosphate, zinc, et magnésium indispensable à la croissance des plantes.

Les plantes cultivées dans les sols salins ont le même comportement de même manière que celles qui poussent sous des conditions d'humidité stressante, et qui réagissent faiblement à l'application des fertilisants.

### **3.8.5. Effet de la salinité sur la croissance**

La réponse immédiate du stress salin est la réduction de la vitesse de l'expansion de la surface foliaire ce qui conduit à l'arrêt de l'expansion si la concentration du sel augmente [67]. Le stress salin résulte aussi dans la diminution de la biomasse sèche et fraîche des feuilles, tiges et racines [68]. La salinité accrue est accompagnée par une réduction significative dans la biomasse racinaire, la hauteur de la plante, le nombre de feuilles par plante, la longueur des racines et la surface racinaire chez la tomate [69]. Le taux élevé de NaCl se manifeste par une croissance dans la biomasse des racines, tiges et feuilles et une augmentation dans le ratio partie racinaire/partie aérienne chez le coton [70].

### **3.8.6. Effet de la salinité sur l'eau dans la plante**

Le potentiel hydrique et le potentiel osmotique des plantes deviennent de plus en plus négatifs avec l'augmentation de la salinité ainsi que la pression de la turgescence [64].

Dans les conditions de concentrations élevées de salinité accrue, le potentiel hydrique de la feuille et la vitesse d'évaporation diminuent significativement chez les halophytes, alors qu'il n'y a pas de changement dans le contenu relatif en eau [65].

### **3.8.7. Effet de la salinité sur l'anatomie de la feuille**

La salinité cause une augmentation de l'épaisseur de l'épiderme, l'épaisseur du mésophylle, la longueur des cellules palissadiques, le diamètre des cellules palissadiques dans les feuilles de l'haricot, du coton et de l'atriplex [64]. La salinité réduit aussi l'espace intercellulaire dans les feuilles [65].

L'épaisseur du mésophylle et de l'épiderme ainsi que l'espace intercellulaire diminuent significativement dans les feuilles traitées avec le NaCl de la mangrove *B. parviflora* [71].

### **3.8.8. Effet de la salinité sur les pigments photosynthétiques et les protéines**

Le taux de la chlorophylle et des caroténoïdes des feuilles diminue en général sous les conditions de stress salin. Les feuilles les plus âgées commencent à développer une chlorose et finissent par tomber pendant une période prolongée de stress salin [72]. Chez *Grevilea*, la protochlorophylle, la chlorophylle et les caroténoïdes diminuent significativement sous le stress salin, mais la vitesse du déclin de la protochlorophylle, la chlorophylle est plus importante que celle de la chlorophylle a et les caroténoïdes. Les pigments anthocyanines augmentent significativement dans ce cas de stress salin [73].

Le contenu des protéines solubles des feuilles diminue en réponse à la salinité [74].

[75], ont rapporté que les protéines solubles augmentent à des niveaux bas de salinité et diminuent en hautes concentrations de salinité chez les mûres.

### **3.8.9. Effet de la salinité sur l'ultra-structure du chloroplaste**

Chez les plantes traitées avec le NaCl, la microscopie électronique a montré que la structure du thylacoïde du chloroplaste devient désorganisée, le nombre et la taille des plastoglobules augmentent et le taux d'amidon diminue [76]. Dans le mésophylle de la patate douce, les membranes des thylacoïdes sont gonflées et la plupart sont perdues sous un stress salin sévère [77].

### **3.8.10. Effet de la salinité sur la photosynthèse**

Le développement des plantes est le résultat de l'intégration et la régulation des processus physiologiques dont le plus dominant est la photosynthèse. La croissance du végétal autant que la production de biomasse est une mesure de la photosynthèse nette et comme les stress environnementaux affectent la croissance donc affectent la photosynthèse [57].

Le stress salin cause des effets à long et à court terme sur la photosynthèse. Les effets à court terme se manifestent après quelques heures jusqu'à un à deux jours de l'exposition au stress, et la réponse est importante ; il y a complètement arrêt de l'assimilation du carbone.

L'effet à long terme s'exprime après plusieurs jours de l'exposition au sel et la diminution de l'assimilation du carbone est due à l'accumulation du sel dans les feuilles en développement [78], aussi on a rapporté qu'il y a suppression de la photosynthèse sous les conditions d'un stress salin [79], et qu'elle ne diminue pas mais plutôt stimulée par de petites concentrations de sel [80].

La diminution de la vitesse photosynthétique est due à plusieurs facteurs :

- la déshydratation des membranes cellulaires ce qui réduit leur perméabilité au CO<sub>2</sub>,
- la toxicité du sel,
- la réduction de l'approvisionnement en CO<sub>2</sub> à cause de la fermeture hydroactive des stomates,
- la sénescence accrue induite par la salinité
- le changement dans l'activité des enzymes causé par le changement dans la structure cytoplasmique [81].

### 3.8.11. Effet de la salinité sur les enzymes antioxydants

En cas de stress biotique ou abiotique, on observe chez les plantes une production rapide et massive d'espèces réactives de l'oxygène. De nombreuses études ont été menées, notamment chez les plantes, afin de préciser quels facteurs entraînent ce phénomène [57].

Le stress salin cause un déficit hydrique comme conséquence à l'effet osmotique sur les activités métaboliques des plantes. Ce déficit hydrique cause un stress oxydatif à cause de la formation des espèces réactives de l'oxygène comme les superoxydes, les radicaux hydroxyles et peroxyde.

Les espèces réactives de l'oxygène qui sont le produit des stress hyperosmotique et ionique causent des dysfonctionnements dans la membrane et la mort cellulaire [82]. Les plantes se défendent contre ces espèces réactives de l'oxygène par l'induction de l'activité de certaines enzymes antioxydantes comme la catalase, la peroxydase, la glutathion réductase et le superoxyde dismutase, qui éliminent les espèces réactives de l'oxygène. L'activité des enzymes antioxydantes augmente sous les conditions de stress salin [76].

### 3.9. Classification des plantes :

L'eau est une source indispensable pour les végétaux. Sa présence est une condition incontournable pour que toute la plante puisse se développer et assurer ses fonctions physiologiques vitales [83]. Cependant, cette ressource n'est pas toujours facile d'accès dans le sol, suivant le milieu naturel. Ainsi les plantes présentes sur des surfaces sèches ou salées vont se retrouver exposées à un stress hydrique important, contre lequel elles devront lutter pour survivre. Dans le cas d'un stress salin, une double problématique se pose à l'organisme végétal: d'un côté la présence du sel, en abaissant le potentiel hydrique du sol, menace l'approvisionnement en eau de la plante. De l'autre, l'absorption du sel dans les tissus menace le bon fonctionnement physiologique des cellules.

Suivant la production de biomasse des végétaux en présence de sel, quatre grandes tendances ont été discernées:

- **halophytes vraies**: dont la production de biomasse est stimulée par la présence de sels. Ces plantes présentent des adaptations poussées et sont

naturellement favorisées par ces conditions: *Salicornia europaea*, *Suaeda maritima*...

- **Les halophytes facultatives**, montrant une légère augmentation de la biomasse à des teneurs faibles en sels: *Plantago maritima*, *Aster tripolium*... [83] ;
- **Les non-halophytes résistantes**, supportant de faible concentration de sel: *Hordeum sp.*... [83] ;
- **Les glycophytes**, sensibles à la présence de sel: *Phaseolus vulgaris*, glycine max...

La réduction du taux de la chlorophylle observé avec l'intensité du stress salin pourrait être attribuée aux conditions dans lesquelles se trouvent les stomates car durant le stress salin, la concentration du CO<sub>2</sub> diminue dans le chloroplaste à cause de la réduction dans la conductance stomatique [84].

### 3.10. Toxicité des sels :

La plupart des ions sont toxiques à des fortes concentrations. Le bicarbonate de sodium (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) augmente le pH de la solution du sol et entraîne les blocages d'absorption des oligo-éléments.

Les ions chloriques et sodiques ont une action toxique en plus de leur action sur la pression osmotique de la solution du sol. Les ions chloriques peuvent être absorbés par les racines et s'accumulent dans les feuilles ce qui peut provoquer une brûlure des extrémités des bords des feuilles, suivi d'un jaunissement [60].

Les symptômes de toxicité typiques aux ions sodium sont des brûlures des feuilles, des dessèchements et la mort des tissus sur leurs bords extrêmes.

Selon [60], les plantes prennent des nuances bleu vert, les feuilles seront plus petites, et succulentes lorsque la concentration en ion chlorite dans le sol est élevée.

Par ailleurs, des hautes concentrations en ions sodium peuvent aussi causées des déficiences en ion calcium, potassium et magnésium [54].

### 3.11. Tolérance des plantes à la salinité :

Deux grandes stratégies de résistance au sel étaient connues chez les plantes :

- Limiter l'entrée de sodium au niveau des racines ou séquestrer le sodium au niveau des feuilles.

- Un nouveau mécanisme de tolérance au sel : la plante protège ses feuilles, en réexportant le sodium des feuilles vers les racines par le flux de sève descendant, de façon à rendre possible une ré-excrétion dans le sol [85].

A l'échelle de la plante entière, les ions chlorures et sodiques entrent par les racines, sont véhiculés par la sève brute jusqu'aux tiges et feuilles. Là, ils sont stockés, soit au contraire très peu retenus et mobilisés par la sève élaborée jusqu'aux racines [1].

[57], montre que les plantes développent un nombre important de mécanismes biochimiques et cellulaires pour faire face au stress salin. Les stratégies biochimiques comprennent :

- l'accumulation sélective ou l'exclusion des ions,
- le control de l'absorption racinaire des ions et leur transport dans les feuilles,
- la compartimentation des ions au niveau cellulaire et au niveau de toute la plante,
- la synthèse de solutés compatibles,
- Le changement dans le chemin de la photosynthèse,
- l'altération de la structure membranaire,
- l'induction des enzymes anti-oxydatives et
- l'induction des hormones végétale.

#### 3.11.1. La régulation ionique et compartimentation

L'absorption ionique et la compartimentation sont importantes non seulement pour la croissance normale mais aussi pour la croissance sous des conditions de salinité [71]. parce que le stress perturbe l'homéostasie ionique. Les plantes qu'elles soient glycophytes ou halophytes, ne peuvent tolérer une grande quantité de sel dans le cytoplasme, et par conséquent sous des conditions de salinité, elles limitent l'excès

de sel dans la vacuole ou compartimentent les ions dans différents tissus pour faciliter leurs formes métaboliques [86].

Les glycophytes limitent l'absorption du sodium dans les tissus âgés qui servent de compartiments de stockage qui sont éventuellement sacrifiés [87]. La suppression du sodium du cytoplasme ou la compartimentation dans les vacuoles est réalisée par des enzymes induites par le sel [88].

### **3.11.2. Biosynthèse de solutés compatibles**

Pour adapter l'équilibre ionique dans la vacuole, le cytoplasme accumule des composés de petite masse moléculaire nommés solutés compatibles parce qu'ils n'interfèrent pas avec les réactions normales biochimiques [89]. En revanche ; ils remplacent l'eau dans les réactions chimiques. Ces solutés compatibles comprennent principalement la proline [90], la glycine bêtaïne [91], les sucres [92] et les polyols [93].

Les polyols sont classifiés comme acycliques (mannitol) et cycliques (pinitol). Le mannitol, un sucre qui sert comme soluté soluble pour faire face au stress salin, est synthétisé via l'action de la mannose-6-phosphate réductase chez le céleri [89]. Les polyols agissent en deux manières qui sont difficile à séparer : ce sont l'ajustement osmotique et osmoprotection. Dans l'ajustement osmotique, ils agissent comme des osmolytes pour faciliter la rétention de l'eau dans le cytoplasme et permettant la séquestration du NaCl dans la vacuole ou l'apoplaste [57].

Les hydrates de carbones comme les sucres (le glucose, le fructose, le saccharose et le fructane) et l'amidon s'accumulent sous le stress salin [74]. La salinité cause la diminution des sucres solubles [94]. Sous les conditions de salinité, le taux de l'amidon diminue dans les racines du riz mais ne change pas dans la partie aérienne [74]. Dans les feuilles de la tomate, le taux des sucres solubles et des saccharides solubles augmente significativement, mais le taux de l'amidon n'est pas affecté par le traitement du NaCl [95].

La proline s'accumule dans les feuilles, les tiges et les racines de *Pringlea antiscorbutica* et cet osmolyte s'accumule 2 à 3 fois plus dans le cytoplasme que dans la vacuole [96].

[97], a rapporté que chez le blé dur (*Triticum durum*) la plupart des acides aminés montrent une augmentation avec l'induction du stress salin ou hydrique. Mais la

proline augmente nettement plus que les autres acides aminés. Le point commun chez les solutés compatibles est que ces composés peuvent être accumulés à des taux élevés sans perturber la biochimie intracellulaire [98]

### **3.11.3. Synthèse et accumulation de la proline :**

La proline désigné généralement sous le nom de soluté compatible chez les eubactéries, les algues, et les plantes supérieures. L'accumulation de la proline est due principalement à la synthèse de novo, et deuxièmement à un taux réduit du catabolisme, et finalement aux systèmes de transport spécifiques qui diffusent la proline aux endroits de besoin. Deux voies possibles de la synthèse de proline ont été démontrées chez les plantes. La première utilisant le glutamate et la deuxième emploie l'ornithine comme précurseur [57]

La dégradation de proline chez les plantes a lieu dans des mitochondries et est catalysée par la proline déshydrogénase (ProDH), également appelée proline oxydase. Une diminution dans le niveau de ProDH ARN m et de l'activité de ProDH a pour conséquence l'accumulation de la proline [99].

La proline et les sucres solubles se sont significativement accumulés dans les feuilles sous l'effet du sel. Ils participeraient aux phénomènes d'ajustement osmotique. Le stress salin a provoqué une désorganisation des membranes thylakoïdiennes et une accumulation de globules lipidiques au niveau du stroma [4].

### **3.11.4. Changement de la voie de la photosynthèse**

Le stress salin inhibe la photosynthèse par la réduction du potentiel hydrique. Donc le but principal de la tolérance à la salinité est d'augmenter l'efficacité de l'utilisation de

L'eau en conditions de la salinité. Pour cette fin, les halophytes facultatives changent leur mode de photosynthèse de C3 en CAM [100]. Ce changement permet aux plantes de réduire la perte de l'eau par l'ouverture des stomates la nuit, donc réduire la perte de l'eau par la transpiration sous des conditions de salinité prolongée. Il y a aussi changement du mode C3 au mode C4 en réponse à la salinité chez les espèces tolérantes à la salinité [101].

### **3.12. Possibilités de réduction de la salinité**

Selon [102], il existe des moyens de prévenir ou de correction de la salinisation, nous pouvons avancer les points suivants :

#### **3.12.1. Lixiviation :**

Elle consiste à apporter l'eau juste un peu plus que nécessaire pour réduire l'accumulation des sels dans la zone radiculaire et ces derniers sont transportés dans la couche aquifère qui les disperse à condition que le drainage naturel soit suffisant [103].

#### **3.12.2. Drainage :**

L'installation des drains ou des puits drainants sont nécessaires pour entraîner une partie de l'eau salée vers les zones où le sel peut être stocké sans risque.

#### **3.12.3. Irrigation :**

Le système d'irrigation goutte à goutte est préférable car il mesure la quantité d'eau distribuée à la surface autour de la plante.

L'irrigation goutte à goutte est caractérisée par un apport d'eau localisé, fréquent et continu, utilisant des débits réduits à des faibles pressions, seule la fraction du sol exploitée par les racines est continuellement irriguée.

L'un des grands avantages de ce système est l'augmentation des rendements et la réduction de la salinisation. Par contre l'irrigation intensive se traduit par des problèmes d'engorgement et de la salinisation.

La variabilité spatiale de l'humidité sous une irrigation goutte à goutte montre que seulement la partie située sous les goutteurs est réhabilitée [104].

Dans cette zone mouillée, le sol reste en permanence humide et aéré. Les sels ne se concentrent pas et la salinité de la solution du sol dans la rhizosphère n'est que légèrement supérieure à celle de l'eau. Les racines des plantes se dirigent de préférence près des goutteurs [60].

D'un autre côté, le maintien de la nappe phréatique dans les périmètres irrigués, à une profondeur de 2 - 3m pour que les phénomènes de remontés capillaires soient réduits [54].

#### **3.12.4. Choix des espèces :**

En choisissant les espèces végétales les plus appropriées pour une situation donnée et également en évitant d'irriguer avec les eaux trop chargées en sels dissous.

#### **3.12.5. Fertilisation :**

Un autre effet important c'est la détermination des possibilités et des formes d'apports de la fertilisation et notamment la connaissance des risques de la salinisation des sols en profondeur et surtout dans les régions où il n'y a pas d'apport d'eau lessivant [105].

La présence de carbonate de calcium peut provoquer une certaine amélioration contre la salinité mais il faut que la quantité de sel apportée par l'irrigation soit égale à la quantité des sels emportés par le drainage. Et ce pour éviter l'accumulation des sels dans le sol [63].

Selon [106], le seul moyen d'améliorer ces sols est d'éliminer le sodium et le remplacer par le calcium.

[60], mis en évidence que l'application d'amendement n'est généralement pas nécessaire, et il n'existe pas une seule méthode de contrôle de la salinité. A cet effet il faut combiner de manière appropriée les facteurs économiques, climatiques, sociales, édaphiques, et hydrogéologiques de la zone concernée.

## **Chapitre 04 : Nutrition hydrominérale des plantes**

### **4.1. Généralités :**

Les plantes terrestres sont par définition adaptées à la vie sur le sol. Cette adaptation, difficilement acquise au cours de l'évolution, est devenue si parfaite que, pour la plupart d'entre elles, le sol est devenu indispensable. C'est lui notamment qui les alimente en eau et en sels. Dans la culture hors sol, les principales fonctions naturelles de ce dernier doivent être assurées artificiellement [38],

### **4.2 Nutrition hydrique :**

L'eau est une source indispensable pour les végétaux. Sa présence est une condition incontournable pour que toute la plante puisse se développer et assurer ses fonctions physiologiques vitales [83],

L'eau présente jusqu'à 85-90% de la matière fraîche. Elle est indispensable à l'activité des végétaux, car elle facilite la pénétration et le transport des sels minéraux [107].

Les besoins en eau dépendent des facteurs liés au climat, au sol et à la culture. Ses besoins peuvent s'estimer grâce à l'évapotranspiration potentielle [108].

L'eau est absorbée par les racines. Elle alimente un flux hydrique continu sol - plante - atmosphère. Il est ici utile de rappeler les principaux rôles de l'eau dans le végétal [41].

### **Rigidité de la plante :**

Le mouvement de l'eau, lié à l'osmose, combiné aux propriétés d'incompressibilité de l'eau produit une pression interne sur les parois cellulaires: c'est l'état de turgescence. Dans les organes dépourvus de tissus de soutien, ce phénomène assure le port dressé et la rigidité de la plante. L'état de turgescence est nécessaire au maintien de l'activité métabolique.

#### **➤ Maintien des structures chimiques et biochimiques :**

L'eau est un solvant polaire qui, par son constant diélectrique élevé, permet la dissociation ionique des électrolytes. Tous les éléments minéraux sont absorbés à l'état d'ions et certains restent dans le végétal sous cette forme. Ainsi l'eau, dans sa phase liquide, est indispensable au maintien des formes ioniques. L'eau joue aussi un

rôle fondamental dans la stabilité des macromolécules. Elle module leur structure tridimensionnelle et les maintient en solution.

➤ **Transport des éléments minéraux et des substances élaborées :**

Au niveau de la plante entière, l'eau est le vecteur de la migration des éléments minéraux absorbés par les racines. C'est aussi en milieu aqueux que sont transportées les substances élaborées dans les feuilles et que sont véhiculés les déchets du catabolisme.

➤ **Régulation thermique :**

L'eau a un rôle essentiel dans le maintien d'une température de la plante qui soit compatible avec son activité métabolique. Du fait de sa haute chaleur spécifique, l'eau contenue dans la plante constitue un volant thermique : cela permet aux végétaux d'absorber de grandes quantités de rayonnement solaire sans subir les effets destructeurs liés à une augmentation inconsidérée de la température. De plus, en raison de sa chaleur latente de vaporisation, le changement d'état de l'eau à température ordinaire (de la phase liquide à la phase gazeuse) constitue un procédé de refroidissement efficace : la transpiration. De fait, la quantité d'eau utilisée par la transpiration est beaucoup plus importante que celle retenue par la plante [109].

➤ **Source d'éléments essentiels :**

L'eau est une source d'éléments essentiels pour le métabolisme des végétaux a décomposition, par hydrolyse ou par oxydoréduction, fournit les différents constituants nécessaires à la biosynthèse de molécules organiques.

➤ **Participation à des réactions biochimiques :**

Les molécules d'eau participent directement à de nombreuses réactions biochimiques d'hydrolyse ou de condensation.

[110], indiquent que la teneur en eau des tissus varie suivant : les espèces, les tissus, l'âge des tissus, l'intensité du métabolisme, la rigidité des tissus, de la croissance, du métabolisme cellulaire, du transport des éléments minéraux et la régulation thermique grâce à l'évapotranspiration.

#### **4.3. Nutrition minérale :**

Les plantes prélèvent les éléments minéraux du sol pour produire les composées organiques. Il est établi que plusieurs éléments sont nécessaires pour le bon fonctionnement de la machine biochimique de la plante. Les éléments nutritifs

doivent être présents sous une forme assimilable pour que les végétaux puissent les absorber. La fertilisation minérale a pour but d'apporter le complément nécessaire selon les besoins physiologiques des plantes pour une croissance et un développement optimum [111].

Les plantes ont besoin d'au moins 16 éléments nutritifs essentiels pour accomplir leur cycle de croissance. Ces éléments sont le carbone, l'oxygène, l'hydrogène, l'azote, le phosphore, le potassium, le calcium, le magnésium, le soufre, le fer, le manganèse, le zinc, le cuivre, le bore, le molybdène et le chlore [112].

Les plantes utilisent l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K) en quantités importantes, et donc les réserves du sol en ces éléments doivent être périodiquement réapprovisionnées afin de maintenir une bonne productivité. Des engrais synthétiques ont été développés pour fournir ces trois éléments majeurs. D'autres engrais ont été mis au point pour fournir les 13 autres éléments nutritifs, en cas de besoin [111].

Un élément minéral indispensable se définit par la réunion de quatre critères :

- Sa présence, même à des teneurs infinitésimales, est nécessaire pour assurer à la plante un développement complet de son cycle végétatif.
- Son absence occasionne plus ou moins rapidement des effets manqués sur la physiologie des plantes.
- Un élément indispensable doit avoir un ou plusieurs rôles spécifiques connus dans le métabolisme du végétal.
- Un élément indispensable doit être spécifique : il ne peut être remplacé dans son intégralité par d'autres éléments similaires.

L'analyse de la matière sèche des végétaux met en évidence trois groupes de constituants :

- Un premier groupe d'éléments dits « Plastiques » au nombre de 9, qui participent à la formation des tissus végétaux et représentent 99% de la masse du végétal ;
- Un deuxième groupe est constitué des oligoéléments au nombre de 6 présents en très faible quantité mais indispensables;
- Le troisième groupe est constitué d'éléments présents en quantités très variantes dont les rôles sont plus ou moins élucidés [113].

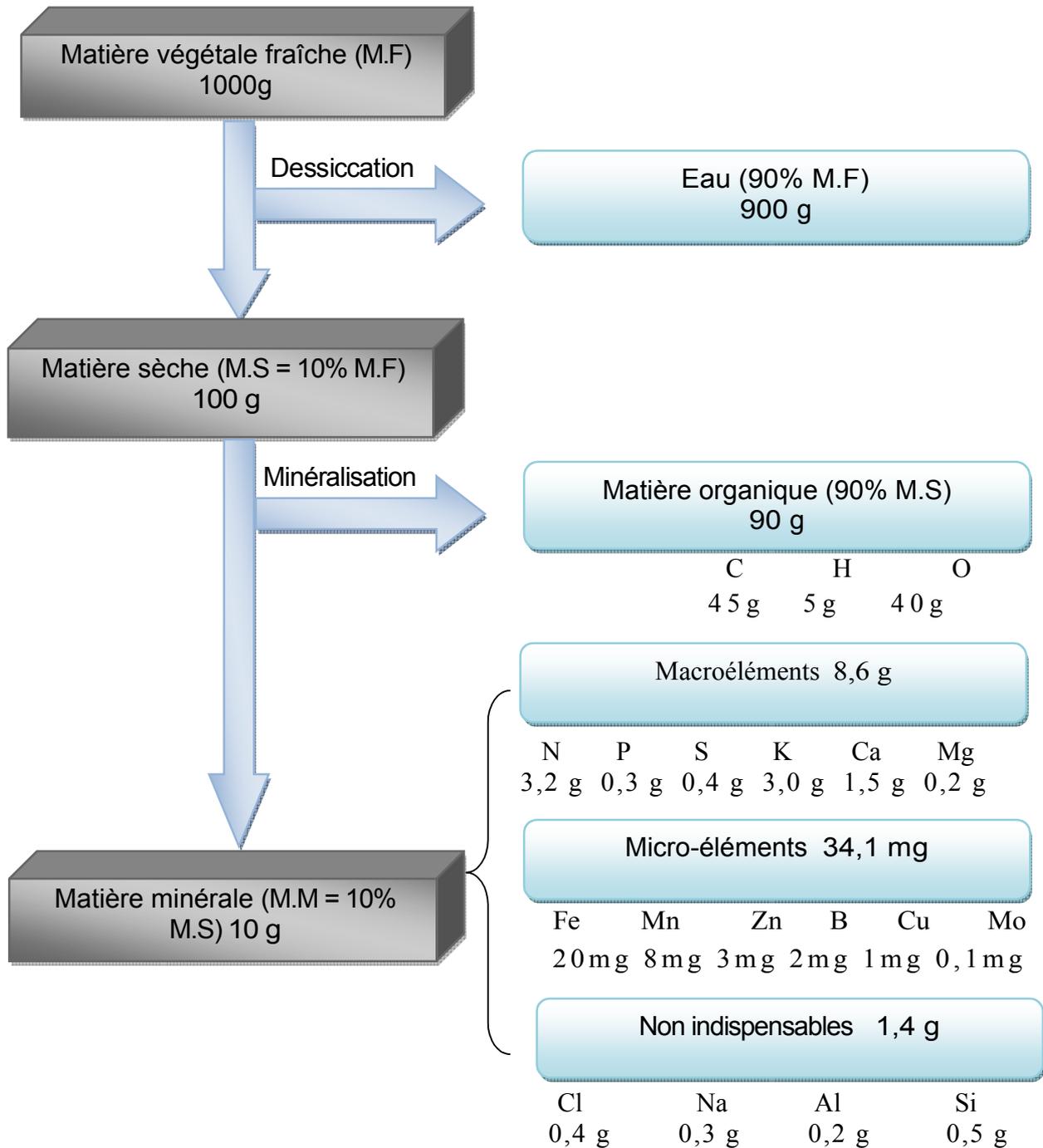
L'absorption de certains ions est inhibée par d'autres ions appelés ions antagonistes exemple : le  $\text{Ca}^{2+}$  inhibe le  $\text{Mg}^{2+}$ , ou stimulée par d'autres ions appelés ions synergistes exemple : l'absorption des ions phosphoriques est facilité par le magnésium.

[113], rapportent que plusieurs facteurs peuvent influencer l'absorption minérale des plantes :

- L'acidité du sol est plus favorable à l'absorption car la plupart des sels sont plus solubles en milieu acide qu'en milieu basique.
- La température influe sur la transpiration ce qui nécessite une absorption importante.
- L'absorption varie en fonction de la teneur en oxygène du milieu de la même façon que la respiration.
- La lumière n'a qu'un effet indirect, une augmentation de l'éclairement provoque une augmentation de la transpiration, ce qui favorise l'absorption.

#### **4.4. Constituants minéraux des plantes :**

L'analyse des plantes montre qu'elles renferment plusieurs éléments minéraux à des proportions variables et sont classés en deux groupes (d'après la figure présenté par [41] in [38] :



**Figure N° 03 :** Analyse minérale d'un modèle végétal (d'après [41] in [38]).

## 4.5. Les éléments majeurs :

### 4.5.1. Azote :

L'azote joue un rôle primordial dans le métabolisme des plantes, car c'est le constituant principal des protéines qui sont les composés fondamentaux de la matière vivante, c'est le facteur essentiel des rendements [34]

Dans le sol, l'azote se trouve essentiellement sous trois formes: organique, ammoniacale et nitrique. Il est assimilé par la plante sous la forme nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) ou ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ). Les plantes peuvent utiliser ces deux formes à la fois dans leur processus de croissance. Cependant, la partie la plus importante de l'azote absorbée par la plante l'est sous forme de nitrate. Cet ion est mobile et circule avec la solution du sol vers les racines de la plante. Sous certaines conditions de température, d'aération, d'humidité et de pH, les micro-organismes du sol changent toutes formes d'azote en nitrate [111].

La forme organique représente presque 95% de l'azote total du sol, notamment sous forme de matière organique. Cet azote est minéralisé progressivement sous l'action de la flore microbienne (1 à 2% par an) pour se retrouver en fin d'évolution sous forme nitrique ( $\text{NO}_3^-$ ) [34].

[106], indique que l'azote en excès entraîne un retard de maturité due à l'allongement excessif de la période végétative, une sensibilité plus grande aux maladies cryptogamiques, parasites, gel et verse.

La carence en azote provoque un retard de la croissance des organes végétatifs, une diminution de taux des protéines et une baisse des rendements [114].

[111], indique qu'en situation de carence d'azotée, les plantes restent chétives, les feuilles se dressent, deviennent plus raides et tournent au vert-clair, le pétiole et les nervures sont plus prononcées à cause du retard de développement des parties succulentes.

### 4.5.2. Phosphore :

Il est absorbé sous forme d'ions  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ . Il rentre dans la constitution des acides nucléiques et des phospholipides. Il confère un haut pouvoir énergétique à certaines molécules par la formation de liaisons riches en énergie exemple ATP nécessaires pour la floraison, nouaison et la précocité de la production [110].

Le phosphore se trouve sous les deux formes  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  et  $(\text{HPO}_4)_2^-$  qui sont dominantes dans la solution du sol. La solubilité des minéraux de phosphore et la concentration des sols en  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  et  $(\text{HPO}_4)_2^-$  sont fortement dépendantes du pH.

L'ensemble des deux dernières formes de phosphore (celui de la solution du sol et celui adsorbé sur le complexe) représente le pool alimentaire qui constitue la fraction du phosphore total considéré comme la principale réserve alimentaire. Elle correspond au phosphore assimilable ou échangeable [111].

En excès, le phosphore peut provoquer un déséquilibre en N/P et une insolubilisation du fer dans le sol entraînant ainsi une décoloration suivie d'un brunissement des feuilles qui se nécrosent et chutent par la suite [115].

Sa carence provoque la coloration violacée ou rouge intense des feuilles, la réduction de la croissance des plants, le retard de la floraison et la perturbation de la fécondation et de la maturité [34].

[111], ajoute que la carence en phosphore peut se présenter sous un état bénin ou un état aigu. L'état bénin se manifeste par une réduction générale de la croissance; la plante est plus élancée, le pétiole s'allonge, les nervures sont plus prononcées et les feuilles sont minces et se dressent. A l'état aigu, les feuilles jaunissent et se nécrosent avec un brunissement roux (non bronzé comme dans la carence potassique).

#### **4.5.3. Potassium :**

Le potassium est absorbé par la plante sous sa forme ionique  $K^+$ . Il est essentiel pour la translocation des sucres et pour la formation de l'amidon. Il intervient dans la régulation osmotique et ionique, ainsi que dans le processus d'ouverture et de fermeture des stomates. Le potassium est nécessaire pour plusieurs fonctions enzymatiques et pour le métabolisme des protéines et des sucres [111].

[106], souligne que le potassium est essentiel pour les plantes car :

- Il agit comme régulateur des fonctions de croissance de la plante, ce qui explique son abondance dans les tissus jeunes, et même son départ des racines vers le sol en fin de croissance ;

- Dans la synthèse des protéines, son absorption est parallèle à celle de l'azote, du moins en début de végétation ;

- Il augmenterait aussi la résistance des végétaux à la sécheresse en limitant la transpiration, et la verse des céréales en augmentant la rigidité des tiges ;

- Il a un rôle d'activateur d'enzymes au sein du métabolisme général ;

➤ Il intervient dans l'équilibre anions /cations et contrôle la transpiration.

Le potassium en excès exprime rarement des symptômes de toxicités mais provoque des troubles dans l'assimilation des nitrates [115].

[111], confirme que les apports massifs de potassium ainsi que des teneurs du sol en potassium trop élevées peuvent induire des carences en magnésium et en calcium et ce la par phénomène d'antagonisme.

La carence en potassium donne des taches brunes puis des trous dans les feuilles [115].

#### **4.5.4. Magnésium :**

Le magnésium est très important dans la plupart des fonctions vitales des plantes. La chlorophylle, pigment vert de la plante, est riche en magnésium. Ce dernier participe à la formation et à la mise en réserve des sucres, hydrates de carbone et vitamines.

C'est un facteur important du fonctionnement de nombreux métabolismes comme celui de carbone nécessaire au maintien des structures des mitochondries, ainsi que dans la fixation de l'azote atmosphérique. De ce fait, il constitue un élément fondamental dans la formation des rendements et de l'obtention de la qualité des produits récoltés. Son excès crée un déséquilibre, une absorption insuffisante du potassium, croissance excessive des racines et des tiges, diminution de la floraison et de la fructification [117].

Le magnésium est très mobile dans la plante, donc en cas de carence il peut être transloqué à partir des feuilles les plus âgées vers les plus jeunes.

Les plantes carencées en cet élément présentent des chloroses plus ou moins vert-jaune entre les nervures des feuilles âgées, suivies parfois de nécrose, Les feuilles restent souvent vertes à la périphérie. Les extrémités et les bords sont en partie bombés vers le haut [111].

#### **4.5.5. Calcium :**

Elle a un rôle déterminant au cours des principales phases de la vie du végétal. Sa présence dans le suc cellulaire est indispensable pour le développement de la plante. Il est impliqué dans la division cellulaire et joue un rôle majeur dans le maintien de l'intégrité des membranes [111].

C'est un constituant de près de 50% des cendres de la plante entière et essentiellement des parois cellulaires. Il joue un rôle dans la neutralisation des acides organiques [34].

Les symptômes visuels de carence sur les feuilles sont des gaufrages ou des déchirements spontanés du limbe. Sur fruit, une mauvaise nutrition calcique est la cause de maladies physiologiques comme la nécrose apicale de la tomate. Il faut noter aussi qu'une carence en calcium réduit la quantité de protéines produites, la croissance étant rapidement stoppée et la sensibilité aux agents pathogènes est augmentée [111].

En période de croissance, la carence en calcium peut provoquer la nécrose des bourgeons terminaux, une augmentation de la sensibilité aux maladies vasculaires (fusariose par exemple), en cours de maturation. A ce même stade l'excès en calcium favorise l'apparition des tâches immature et l'évolution des collets verts [118].

L'excès de calcaire provoque la chlorose ferrique par inhibition de l'absorption du fer et du manganèse dont le résultat est le jaunissement et à l'extrême la nécrose du feuillage [111].

#### **4.5.6. Soufre :**

Le soufre est absorbé à partir du sol sous forme d'ion  $(SO_4)^{2-}$ . Il peut être absorbé à partir de l'air sous forme dioxyde  $SO_2$  quand l'atmosphère est riche en soufre provenant des sources industrielles. Le soufre est un constituant de trois acides aminés (cystine, méthionine et cystéine) et par conséquent il est nécessaire pour la synthèse des protéines. Il est également essentiel pour la formation des nodules dans les racines des légumineuses [111].

Il joue un rôle fondamental dans le métabolisme des vitamines. C'est un constituant des produits responsables des odeurs et saveurs de certaines plantes exemple : ail, oignon, chou, haricot [34].

L'excès du soufre se traduit par une couleur verte brunâtre. Les tiges sont dures, les feuilles se courbent vers l'intérieur et les bords brunissent [119].

Le soufre est considéré comme un élément peu mobile dans la plante. Les effets de sa carence se manifestent d'abord sur les jeunes organes qui présentent une chlorose liée à une diminution de la teneur en chlorophylle [111].

Elle induit aussi a une réduction de croissance, les jeunes feuilles deviennent vert pâle à jaunes, les tiges deviennent rigides et cassantes. Les nervures sont souvent plus claires que le reste de la feuille et la plante est d'un vert clair. On observe aussi un dessèchement comme pour une carence en azote. Les racines sont nombreuses, blanches et ramifiées. Les plantes sont chétives et petites [34] et [111].

#### **4.6. Les éléments mineurs :**

Les oligo-éléments sont des composés chimiques indispensables aux plantes, exigés en quantités infimes pour la croissance, le développement et la physiologie des plantes cultivées [120]. Les plus importants sont au nombre de huit: Le fer (Fe), le manganèse (Mn), le zinc(Zn), le cuivre (Cu), le bore (B), le molybdène (Mo), le chlore (Cl) et le nickel (Ni) [111].

Le même auteur montre qu'on distingue deux types de déficience due aux oligo-éléments:

- **La déficience absolue, originelle ou vraie**, due à l'absence presque totale de l'élément en réserve dans le sol. Dans ce cas, il suffira d'ajouter au sol l'élément qui fait défaut pour que la carence disparaisse.

- **Les carences conditionnées, relatives ou induites**, généralement observées dans les conditions de la pratique agricole. Dans ce cas, l'élément considéré ne manque pas dans le sol, mais il est rendu inassimilable; ce blocage est souvent dû à un pH élevé, à des antagonismes d'ions, à un taux élevé de matière organique ou à des pertes dues au lessivage.

##### **4.6.1. Fer :**

Le fer est l'oligo-élément qui est nécessaire en plus grande quantité. Le fer est un constituant de plusieurs enzymes : catalase, peroxydase et cytochrome oxydase.

C'est un élément essentiel dans la formation de la chlorophylle, dans le transport d'oxygène [116].

Les symptômes de carence apparaissent sur les jeunes feuilles qui présentent une chlorose entière sauf le long des nervures qui restent bien vertes [34].

La déficience en fer peut être induite lorsque le pH du sol est élevé, dans des situations de mauvaise aération, ou quand on a des niveaux élevés de zinc, de manganèse et de calcaire. Les symptômes varient avec l'âge de la feuille, la sévérité de la déficience et parfois avec les conditions du milieu [111].

#### **4.6.2. Molybdène :**

Le molybdène est un constituant de l'enzyme impliquée dans la fixation de l'azote gazeux par le *Rhizobium* des légumineuses et de celle impliquée dans la réduction des nitrates [34] et [111].

La déficience en molybdène est conditionnée par plusieurs facteurs notamment le pH du sol, la matière organique, et les interactions avec les autres éléments minéraux. C'est le seul oligo-élément dont la carence est favorisée par l'acidité du sol et disparaît généralement suite à un chaulage. Ainsi, l'absorption de molybdène par les plantes est favorisée par un pH élevé [34]. Elle provoque une réduction de la croissance, le feuillage est vert clair et il y'a apparition d'anomalies sur la partie végétative

#### **4.6.3. Manganèse :**

Le manganèse est reconnu comme un important activateur des enzymes d'oxydoréduction, de décarboxylation et de transfert des radicaux. Il joue un rôle dans la synthèse de la chlorophylle, dans la résistance au gel et activateur du nitrate réductase. Son excès est un facteur limitant de la croissance des plantes dans les sols acides et asphyxiants [121].

Dans un sol riche en matière organique, à pH neutre ou alcalin, les risques d'apparition d'une carence en manganèse sont importants. Le pH agit sur l'assimilation du manganèse en favorisant l'oxydation de  $Mn^{2+}$  soluble. Sa carence provoque une décoloration inter-nervaire diffuse sur les feuilles âgées [34].

La déficience en manganèse affecte la formation des chloroplastes, l'intensité de la photosynthèse et l'activité du nitrate réductase. Il en découle une accumulation considérable des nitrates. Par ailleurs, il a été signalé que le manganèse est impliqué dans la régulation de l'absorption de l'eau par la plante. On pense également que le manganèse confère aux plantes la résistance contre certaines maladies; c'est le cas du virus BMV, virus affectant la betterave [111].

#### **4.6.4. Cuivre :**

L'implication du cuivre dans la chaîne photosynthétique a été démontrée par plusieurs auteurs. En effet, 70 % du cuivre disponible dans la plante est localisé dans les chloroplastes. Le cuivre intervient aussi dans la formation de la lignine qui est parmi les éléments qui confèrent à la cellule son élasticité ainsi que sa stabilité [34].

Par ailleurs, l'implication du cuivre dans le processus de fixation biologique de l'azote et dans la régulation de l'absorption du manganèse. En présence d'une carence en cuivre, l'absorption de manganèse s'accélère conduisant ainsi à la toxicité de la plante. Ce phénomène s'observe surtout dans les sols acides [111].

L'excès en cuivre provoque les mêmes symptômes que la chlorose ferrique, la croissance est réduite plus particulièrement celle des racines [122].

Le cuivre est un élément dont la plante a besoin en faibles quantités dans une fourchette de 25 à 150 g/ha. La carence en cuivre est souvent rencontrée dans les sols organiques et expliquée par le fait que le cuivre est plus rapidement adsorbé par la matière organique du sol que les autres éléments. Un pH élevé peut aussi induire un stress nutritionnel en cuivre, la déficience en cuivre est observée au-dessus du pH= 7 [34].

La carence en cuivre a été signalée après une fertilisation azotée intense. Ceci est dû au fait que la fertilisation azotée retarde la sénescence des feuilles âgées. La translocation du cuivre à partir de ces feuilles est diminuée. Un antagonisme entre zinc et cuivre a été décelé. Les symptômes de carence en cuivre se manifestent d'abord sur les jeunes feuilles, en raison de la faible mobilité du cuivre [111].

#### **4.6.5. Zinc :**

C'est un élément indispensable dans le métabolisme de la plante, le zinc est l'activateur de l'enzyme anhydrase carbonique, enzyme essentielle pour l'utilisation de l'acide carbonique.

Il est un activateur de plusieurs autres métallo-enzymes. C'est le cas des déshydrogénases en particulier, la déshydrogénase de l'acide glutamique, la déshydrogénase de l'acide lactique et la déshydrogénase de l'alcool, ainsi que certaines protéases et peptidases [59].

De même, le zinc contrôle la synthèse de l'acide indolacétique qui est un régulateur de croissance très important pour la plante, et augmente la résistance des plantes aux maladies fongiques.

Il a un rôle dans la biosynthèse des glucides et des protéines, et plus particulièrement de l'auxine et dans le métabolisme du soufre [59].

Sa carence provoque la nanification des plantes et leur donne un port en rosette, ainsi que de mauvaises nouaisons dues à la perturbation du métabolisme du phosphore [34].

Le pH est considéré le facteur le plus déterminant dans la déficience relative du zinc, notamment lorsque la teneur du zinc dans la solution du sol est faible. Le pH influence la mobilité et la concentration du zinc dans la solution du sol. La mobilité du zinc dans la solution du sol diminue avec l'augmentation de pH du sol. Il a été également démontré que l'acidification du milieu rendant le pH de 6,5 à 5,3 augmente l'assimilation de zinc de 50 %. La déficience en zinc a un effet négatif sur la fructification et le développement embryonnaire; peu de graines sont formées et les fruits sont de calibre médiocre [111].

#### **4.6.6. Bore :**

[34], montre que le bore est prélevé par la plante sous forme d'acide borique  $H_3BO_3$  dans des sols ayant un pH inférieur à 9. Le bore joue un rôle dans:

- La migration et l'utilisation des glucides et des assimilés;
- La formation des ribosomes, la synthèse des protéines et la croissance méristématique ;
- L'absorption du potassium, du phosphore, du magnésium et autres cations;
- La stérilité ou la malformation des tissus reproductifs, en cas de carence en bore

La teneur moyenne des sols en bore varie de 1 à 2 ppm. Au dessous de 0,6 ppm, il y a risque de carence. L'assimilation du bore diminue quand le pH augmente. Il y a une corrélation négative entre le pH du sol et l'assimilation du bore, surtout pour des pH >6,5 [111].

La carence en bore provoque l'éclatement des membranes des tissus des bourgeons terminaux, des fleurs et des fruits provoquant des crevasses rapidement attaquées par les bactéries. Les racines se nécrosent à leur extrémité [120].

## Chapitre 05: Matériel et méthodes

### 5.1. Objectif d'expérimentation :

Le présent travail a pour objet de déterminer :

- ❑ le Comportement des plantes du tomate variété « Saint-Pierre » cultivée en hors-sol, irriguée par trois traitements salins naturelles puis corrigés et un témoin;
- ❑ Le ou les sels ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{MgCl}_2$ ) les plus nocifs et les plus agressifs sur la croissance et le développement de la tomate;
- ❑ La stratégie de défense chez les plantes lors d'un stress salin .

### 5.2. Matériel végétal :

L'espèce utilisée durant notre l'expérimentation est la tomate (*Solanum lycopersicum*), variété Saint-pierre dont les semences proviennent de l'institut technique des cultures maraichères et industriels (ITCMI) de Staouali. La semence est originaire de la France, et récoltée en 2008 avec une pureté spécifique de 99%. Cette variété est une:

- Variété fixée demi précoce et productive;
- Les fruits sont de forme cylindrique, à couleur rougeâtres;
- Variété tolérante à la salinité:
- Bonne aptitude à la fructification.

### 5.3. Conditions expérimentales:

#### 5.3.1. Lieu de l'expérience :

L'expérimentation a été réalisé à la station expérimentale du département d'agronomie de Blida, dans une serre en polycarbonate dont : l'orientation est nord sud, l'aération est assurée par plusieurs fenêtres placées latéralement de part et d'autre de la serre. Des radiateurs ont été installés au niveau de la serre pour assurer le chauffage pendant l'hiver.



Source: Google earth 2011

Le tableau N° 1 indique les moyennes des températures par semaine enregistrées au niveau de la serre, durant trois moments de la journée ,08<sup>h</sup> ,12<sup>h</sup>, et 16<sup>h</sup>

**Tableau N°11** : Moyennes des températures par semaine enregistrées sous serre en (C°):

Périodes	Températures en C°		
	08 <sup>h</sup>	12 <sup>h</sup>	16 <sup>h</sup>
<b>30-11-10 au 09-12-10</b>	15.5	25	22.3
<b>10-12-10 au 19-12-10</b>	11.9	20.3	20.1
<b>20-12-10 au 29-12-10</b>	12.4	21.8	20.9
<b>30-12-10 au 08-01-11</b>	13.2	24.4	23
<b>09-01-11 au 18-01-11</b>	16.8	25	23.75
<b>19-01-11 au 28-01-11</b>	12.4	20.3	19.25
<b>29-01-11 au 07-02-11</b>	13.3	20.4	21.4
<b>08-02-11 au 17-02-11</b>	13.2	23.8	23.35
<b>18-02-11 au 27-02-11</b>	12	21.9	23.3
<b>28-02-11 au 09-03-11</b>	13.2	26.7	25.9
<b>10-03-11 au 19-03-11</b>	14.4	25.4	25.85
<b>20-03-11 au 29-03-11</b>	15.5	30	28.5
<b>30-03-11 au 08-04-11</b>	19.3	32.6	30.1
<b>09-04-11 au 18-04-11</b>	19.1	28.7	29.4

D'une manière générale, nous pouvons dire que les températures pendant le cycle végétatif répondaient aux besoins des plantes, mis à part durant les périodes froides où on avait enregistré quelques chutes de température sans dommage remarquable.

#### **5.4. Essai de germination :**

Les graines de tomate de la variété Saint- pierre sont stérilisées par trempages successifs dans les bains suivants :

- ❖ Hypochlorite de sodium à 15% pendant 2 minutes ;
- ❖ Deux rinçages à l'eau distillée ;
- ❖ Alcool 90° pendant une minute.

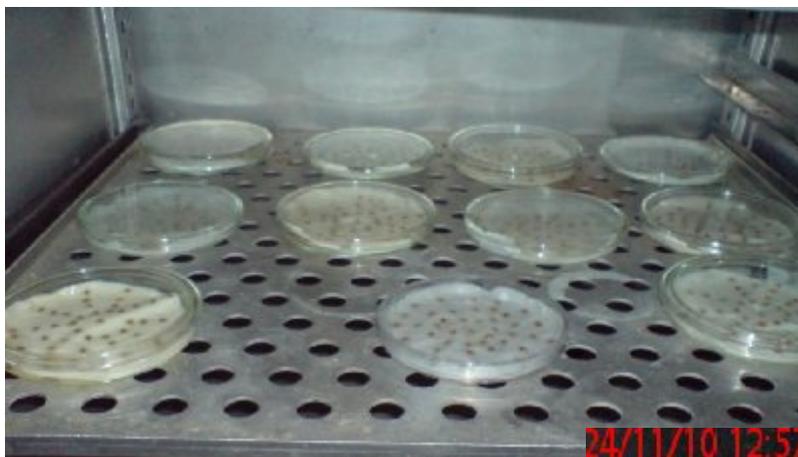
Par la suite, elles sont séchées sur papier filtre stérile avant d'être déposées dans des boîtes de Pétri contenant trois couches de papier filtre stérile imbibé d'eau distillée stérile.



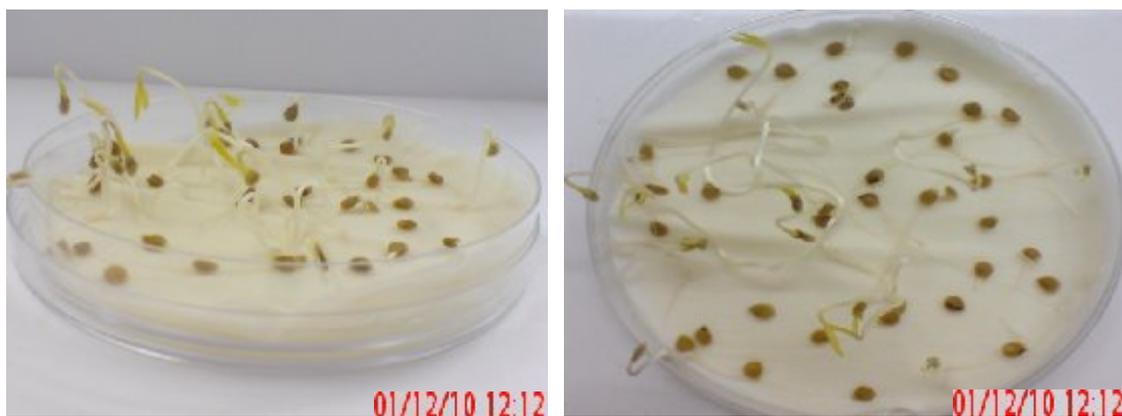
**Figure N°04 :** Grains de tomate mises en germination à 25C° dans les boîtes de Pétri

#### 5.4.1. Conditions de germination :

Les boîtes de Pétri, contenant chacune 45 graines, sont placées dans une étuve à  $25\pm 1^{\circ}\text{C}$  pendant une semaine. De l'eau distillée stérile est ajoutée en cas de dessèchement du papier filtre.



**Figure N°05:** Graines de tomate mises en germination à l'intérieur de l'étuve (25C°)



**Figure N06** : Aspect général des grains de tomate après germination

#### 5.4.2. Repiquage des germes :

Après la germination des grains, un repiquage des jeunes germes de tomate en place définitive a été réalisé le 01.12.2010 à raison de deux germes par pot. Soit 09 jours de près germination.



**Figure N07** : Aspect général des jeunes plantules de tomate après le repiquage

Les jeunes plantules de tomate sont irriguées jusqu'à l'apparition des deux feuilles cotylédonaires par l'eau courant tiède pour favoriser la reprise des jeunes plantules jusqu'à la date de 08.12.2010. Après ce stade, les jeunes plantules sont irriguées par une solution nutritive standard (T<sub>4</sub>) composée des macros et des micros éléments et ce dans le but d'avoir un matériel végétal vigoureux et homogène de départ.

Dès l'apparition de la cinquième feuille, nous avons procédé à l'application des différents traitements et ce le 15.12.2010, soit 22 jours après semis.



**Figure N°08** : Stade végétatif en début de traitement

#### 5.4.3. Substrat et conteneurs:

Le substrat utilisé dans notre expérimentation est du gravier roulé d'oued 3 à 8 mm de diamètre. Il provient de la carrière de Chebli situé à 25 Km d'Alger.

Afin d'écartier tous les risques de contamination, une procédure de désinfection du substrat a été effectuée comme suite :

- Lavage à l'eau afin de supprimer les particules terreuses et les débris végétaux ;
- Remplissage des pots avec le gravier lavé;
- Désinfection du gravier avec une solution Hypochlorite de sodium diluée de concentration initiale 12°, durant 24<sup>h</sup> ;
- Rinçage abondant de tous les pots à l'eau courante pour éliminer toutes les traces de l'eau de javel fortement nocives pour les jeunes plantes ;

Les conteneurs utilisés dans notre expérimentation sont des pots en plastique, de couleurs marron ayant une capacité de 5000ml et présentant des orifices de drainage à leur base permettant l'évacuation de la solution nutritive excédentaire.



**Figure N°09** : Aspect général des conteneurs

### 5.5. Dispositif expérimental:

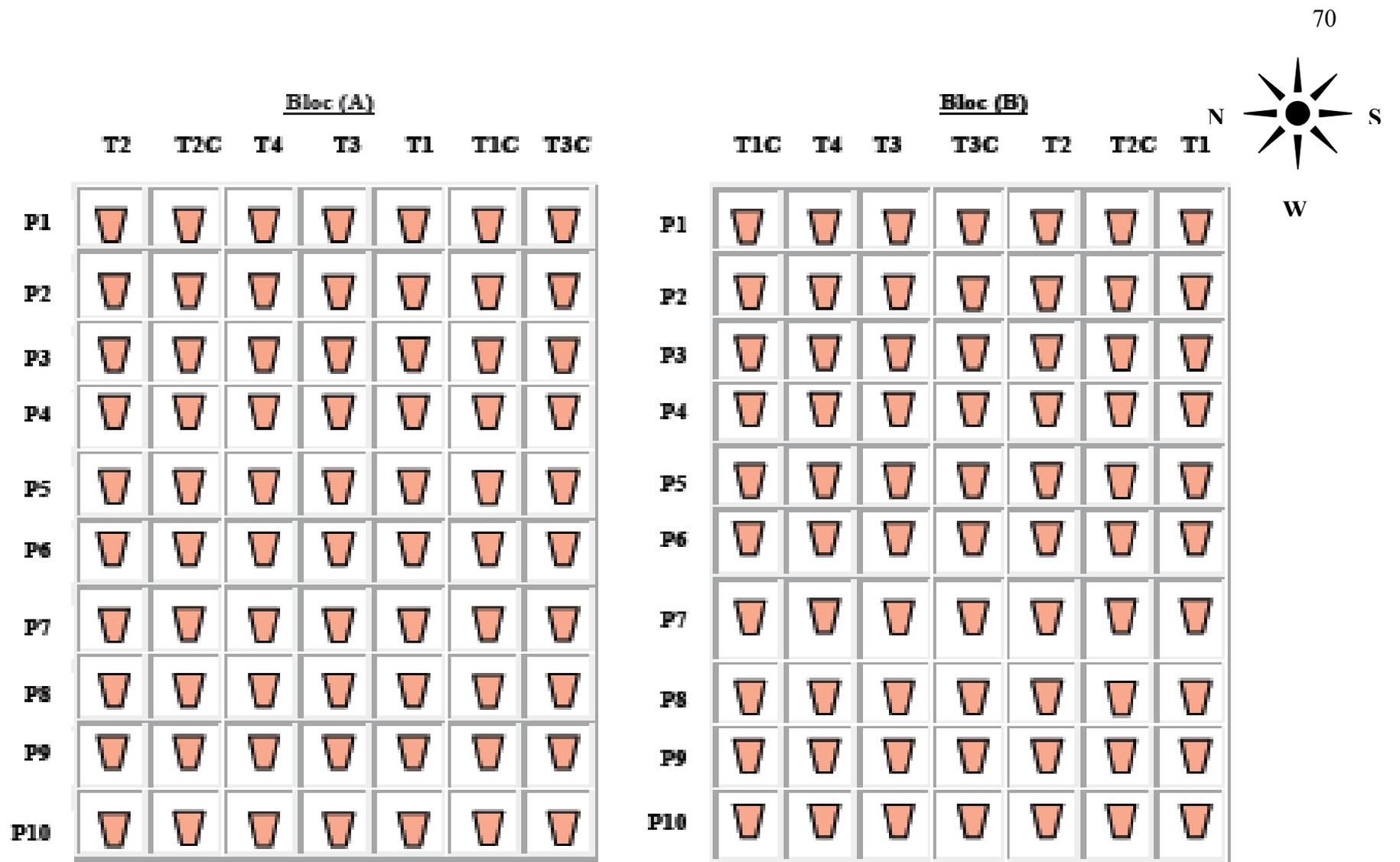
Le plan expérimental mené dans notre expérimentation est un bloc aléatoire complet à deux répétitions composé de sept (7) traitements qui ont été distribués selon la table de permutation des nombres aléatoires de 1 à 10 pour chaque plant, on a dix (10) observations par traitement. Soit 140 plantes au total.



Figure N°10 : Dispositif expérimental

### 5.6. Analyse statistique:

Les données obtenues sont soumises à une analyse de la variance à un facteur étudié (solution d'irrigation), les moyennes sont comparées selon la méthode de Newman et Keuls qui est basée sur la plus petite valeur significative, réalisés par le logiciel STAT ITCF version 13.31. On considère que les résultats sont significatifs quand  $P \leq 0,05$ .



T1, T2, T3, T1C, T2C, T3C, T4 : les plantes et les observations

P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10 : les observations

Figure N°11 : Schéma du dispositif expérimental

**Les différents traitements ayants constitués notre dispositif expérimental sont :**

**T1** : solution saline naturelle d'oued Chélif reconstituée avec l'eau de Blida où le sodium ( $\text{Na}^+$ ) est lié aux sulfates ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) et le magnésium ( $\text{Mg}^{+2}$ ) est lié aux chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) ;

**T1C** : solution saline **T1** d'oued Chélif corrigée ;

**T2** : solution saline naturelle d'oued Chélif reconstituée avec l'eau de Blida où le sodium ( $\text{Na}^+$ ) est lié aux chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) et le magnésium ( $\text{Mg}^{+2}$ ) est lié aux sulfates ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) ;

**T2C** : solution saline **T2** d'oued Chélif corrigée ;

**T3** : solution saline naturelle d'oued Chélif reconstituée avec l'eau de Blida où le sodium ( $\text{Na}^+$ ) et le magnésium ( $\text{Mg}^{+2}$ ) sont liés en fraction avec les chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) et aux sulfates ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) ;

**T3C** : solution saline **T3** d'oued Chélif corrigée ;

**T4** : solution nutritive standard composée de macro, et de micro éléments et de fer.

## **5.7. Description des différents traitements :**

### **5.7.1. Caractéristiques de l'eau utilisée pour la synthèse des traitements et correction :**

Nous avons préparé toutes les milieux nutritifs avec l'eau potable de Blida, pour des raisons pratiques et compte tenu des besoins en eau importants des plantes en cours de cycle de développement.

**Tableau N°12** : Teneur des différents éléments minéraux contenus dans l'eau de Blida :

<b>Elements</b>	<b>Teneur en mg/l</b>	<b>Teneur en meq /l</b>
<b>K<sup>+</sup></b>	00	00
<b>Ca<sup>++</sup></b>	56	2.8
<b>Na<sup>+</sup></b>	29.9	1.3
<b>Mg<sup>++</sup></b>	21.6	1.8
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	21.7	0.35
<b>SO<sub>4</sub><sup>--</sup></b>	38.4	0.8
<b>CL<sup>-</sup></b>	21.3	0.6
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	245	4.08
<b>total</b>	<b>433.9</b>	<b>11.73</b>

Source : [123].

L'analyse de l'eau de Blida présentée dans le tableau ci-dessus révèle une quantité assez élevée en ions bicarbonates (4.08 méq/l) ; ce qui rend le milieu plus basique (pH = 7.8), nécessitant une correction de pH favorable pour l'espèce testé.

La correction de l'eau consiste donc à utiliser des acides pour détruire partiellement les bicarbonates et ramener le pH au voisinage de 5.5 à 5.8 jugés le plus favorable pour le développement et la croissance des plantes.

Deux types d'acides ont été utilisés à savoir, l'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ ) et l'acide phosphorique ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ). Ces deux acides permettent d'une part l'abaissement du pH et l'apport des éléments utiles tels que les nitrates et les phosphates.

La quantité d'acide à apporter est calculée selon la formule suivante:

$$Q \text{ (meq/l)} = (\text{quantité d'HCO}_3 \text{ dans l'eau en méq/l}) \times 0.833$$

$$Q = 4.08 \times 0.833 = 3.39 \text{ méq / l d'eau}$$

Cette quantité d'acide sera partagée entre:

- $\text{H}_3\text{PO}_4 = 1.1 \text{ méq / l}$  (correspondant aux besoins des végétaux qui sont de 3.3 méq / l de phosphore) compte tenu que  $\text{H}_3\text{PO}_4$  est trivalent.
- $\text{HNO}_3 = 3.3 - 1.1 = 2.2 \text{ méq / l}$  (besoin partiel en nitrates).

### **5.8. Composition des solutions nutritives et techniques de préparation des différents traitements :**

Il est rappelé que, sept solutions nutritives ont été utilisées.

La façon de calculer la composition de la solution nutritive n'est pas la même si nous avons une eau très peu chargée (cas de l'eau de Blida) ou au contraire très chargée en ions (cas de l'eau d'oued Cheliff).

### **5.9. Formule de solution nutritive pour une eau naturelle peu chargée en ions : Cas de l'eau de Blida transformé en solution nutritive (T<sub>4</sub>).**

Pour ce type de solution nutritive, l'eau renferme des teneurs insuffisantes en certains éléments utiles ( $\text{KNO}_3^-$ ). Parfois des éléments tels que le sodium, le calcium et les sulfates peuvent se trouver à des concentrations supérieures aux besoins des plantes.

D'une façon générale, pour une eau peu chargée en sels, on peut rajouter des éléments pour corriger les déficits et équilibrer la balance ionique.

La formule de solution nutritive peu chargée en sels correspond à la solution nutritive de base synthétisée avec l'eau de Blida selon les normes définies par [124]. Les différentes étapes adoptées pour la réalisation de cette solution sont les suivantes:

**a/** Sur les tableaux 3 et 4 suivants, on reporte chaque anion et cation selon les quantités contenues dans l'eau exprimées en méq / l.

**b/** L'apport d'azote est fixé à 12 méq / l

}	10.2 méq / l $\text{NO}_3^-$ représentant 85%
}	1.8 méq / l $\text{NH}_4^+$ représentant 15%

**c/** L'apport de chlore et de sodium étant au-delà des besoins normaux des plantes (0.2 meq/l) aucun apport complémentaire n'est nécessaire.

**d/** L'apport du phosphore est fixé à 3.3 méq / l de  $\text{H}_3\text{PO}_4$ . En comptant de façon théorique, P présent sous la forme trivalent  $\text{PO}_4^{3-}$ , 1.1 méq / l de  $\text{H}_3\text{PO}_4$  satisferont les besoins en phosphore.

La quantité d'acide nécessaire pour ajuster le pH de l'eau à 5,8 est de 3,3 méq/l ceci permet de satisfaire la totalité du besoin en phosphore en apportant 1,1 méq/l de  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , et un apport partiel de 2.2méq/l de  $\text{NO}_3^-$ .

**e/** A ce niveau, on fait le bilan des anions restant à introduire dans la solution nutritive:

Nitrates: - besoins: 10,2 méq / l.

- déjà disponibles: 0,35 méq / l (eau) + 2,20 méq / l (correction de pH) = 2,55 méq / l.

- à apporter: 10,2 méq / l - 2,55 méq / l = 7,65 méq / l.

- déjà disponibles: 0,8 méq / l.

- à apporter: 1,5 méq / l – 0,8 méq / l = 0,7 méq / l.

**f/** L'apport d'ammonium (1,8 méq / l de  $\text{NH}_4^+$ ) est assuré par l'emploi de  $\text{NO}_3\text{NH}_4$  qui assurera en même temps l'apport de 1,8 méq / l de  $\text{NO}_3^-$ . Les anions disponibles pour apporter un complément de K, Ca et Mg sont désormais les suivants:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Nitrates: } (7,65 - 1,8) \text{ NO}_3\text{NH}_4 = 5,85 \text{ m\acute{e}q / l} \\ \text{Sulfates} = 0,7 \text{ m\acute{e}q / l} \end{array} \right\} \text{Total} = 6,55 \text{ m\acute{e}q / l}$$

g/ somme totale des cations K, Ca et Mg dans la solution nutritive finale = (k + Ca + Mg) déjà présents dans l'eau + (K + Ca + Mg) apportés sous forme de nitrates et de sulfates.

$$\text{Total} = (0 + 2,8 + 1,8) + 6,55 = 11,15 \text{ m\acute{e}q / l.}$$

Selon les normes définies par [124], les proportions relatives de ces 3 éléments doivent être proches des valeurs suivantes:

$$\text{K : } 39,6\% \qquad \text{Ca : } 47,6\% \qquad \text{Mg : } 12,8\%$$

Ce qui donne dans le cas présent:

$$4,41 \text{ m\acute{e}q / l (K)} + 5,31 \text{ m\acute{e}q / l (Ca)} + 1,43 \text{ m\acute{e}q / l (Mg)} = 11,15 \text{ m\acute{e}q / l.}$$

Apport à réaliser, sous déduction de ce qui est déjà présent dans l'eau.

$$\text{K (4,41 m\acute{e}q / l), Ca (2,51 m\acute{e}q / l), Mg (0 m\acute{e}q / l).}$$

L'apport de Mg n'étant pas nécessaire compte tenu que : la teneur de l'eau est supérieur à l'apport souhaitable. Les  $11,15 \text{ m\acute{e}q / l} - 1,8 \text{ m\acute{e}q / l (Mg)} = 9,35 \text{ m\acute{e}q / l}$  d'anions sont donc à partager entre K et Ca uniquement et en respectant les proportions  $\text{K} + \text{Ca} = 87,2$  soit:

$$\text{K} = 9,3 \times \frac{9,6}{39,6 + 47,6} = 4,25 \text{ m\acute{e}q / l}$$

$$\text{Ca} = 9,3 \times \frac{47,6}{39,6 + 47,6} = 5,10 \text{ m\acute{e}q / l}$$

Tous les résultats sont reportés dans les tableaux suivants:

**Tableau N° 13:** Composition de l'eau de Blida

Eau de Blida	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Total
	0.35	0	0.80	0.60	
K <sup>+</sup>					0
0					
Na <sup>+</sup>					1.30
1.3					
Ca <sup>++</sup>					2.80
2.8					
Mg <sup>2++</sup>					1.80
1.8					
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>					0
0					
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>					4.08
4.08					
Total	0.35	0	0.80	0.60	

pH = 7,8

**Tableau N° 14** Eau de Blida corrigée T4 (Solution nutritive standard)

Eau de Blida	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Total
	0.35	0	0.80	0.60	
K <sup>+</sup>	3,55		0,70		4,25
0					
Na <sup>+</sup>					1,30
1.3					
Ca <sup>++</sup>	2,30				5,10
2.8					
Mg <sup>2++</sup>					1.80
1.8					
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	1,80				1,80
0					
H <sup>+</sup>	2,20	1,10			3,30
Total	10,20	3,30	1,50	0.60	

pH = 5,8

Les différents traitements sont élaborés à base de solution mère de macroéléments puis dilué au moment de la préparation de la solution prête à l'utilisation. Un certain ordre de dissolution est respecté afin d'éviter toute précipitation et ceci en commençant par les produits à fonction acide et les plus solubles, en suite on rajoute au fur et à mesure les autres produits. En dernier lieu, nous avons rajoute une solution d'oligoéléments composée des deux solutions complémentaires d'oligoéléments préconisées par [124]. Le contrôle de pH de la conductivité électrique est obligatoire avant chaque utilisation.

**5.9.1. Quantités et ordre de dissolution des sels de la solution nutritive élaboré avec l'eau de Blida (T4)** (Il faut rajouter la quantité des sels existant dans l'eau de Blida qui est égale à 433.90mg/l).

- HNO<sub>3</sub><sup>-</sup> = 2.20 × 63 = 138,6 mg/l
  - H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> = 1.10 × 98 = 107.8 mg/l
  - Ca (NO<sub>3</sub>) = 2.30 × 118 = 271.4 mg/l
  - KNO<sub>3</sub> = 3.55 × 101.10 = 358.90 mg/l
  - NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> = 1.80 × 80.04 = 144.07 mg/l
  - Ca (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> = 2.30 × 118.07 = 271.56 mg/l
  - K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 0.7 × 87 = 60.9 mg/l
- Total = 1767.13 mg/l

Les solutions d'oued Chélif salines corrigée reconstituée avec l'eau de Blida renferme aussi la solution complémentaire d'oligo-éléments représentés dans le tableau n°9:

**Tableau N°15:** Composition des solutions complémentaires d'oligo-éléments A et B

Solution « A »			Solution « B »		
Eléments	Dose g/l	Prélèvement (ml)	Elément	Dose g/l	Prélèvement (ml)
Molybdate d'ammonium (NH <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> (MO <sub>7</sub> O <sub>24</sub> ) 4H <sub>2</sub> O	0,5	0,1	Séquestrène de fer	2	5
Acide borique (H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> )	15,0				
Sulfate de manganèse (MnSO <sub>4</sub> ,5H <sub>2</sub> O)	20,0				
Sulfate de cuivre (CuSO <sub>4</sub> , 5H <sub>2</sub> O)	2,5				
Sulfate de zinc (ZnSO <sub>4</sub> , 7H <sub>2</sub> O)	10				

**5.10. Formule de solution nutritive pour une eau naturelle chargée en ions :  
Cas de l'eau d'oued Chélif :**

Pour ce type de solution nutritive, l'eau renferme des teneurs nettement supérieures aux besoins de certaines espèces végétales, notamment pour le cas du sodium, du calcium, du magnésium, des sulfates et des chlorures. Dans ce cas on ne s'occupera pas de l'équilibre K, Ca et Mg.

Les différentes étapes à suivre pour la réalisation de solution nutritive sont les suivantes:

**a/** On reporte pour chaque anion et cation les quantités dans l'eau exprimées en méq / l.

**Tableau N°16** : Eau d'oued Chélif naturelle, reconstituée avec l'eau de Blida T1 où le sodium est lié aux sulfates et le magnésium est lié aux chlorures (pH = 7.34) :

Eau de Blida	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Total
	0,35	0,00	0,80	0,60	
K <sup>+</sup> 0,00					0,00
Na <sup>+</sup> 01,30			8,60		09,90
Ca <sup>++</sup> 02,80				6,45	09,25
Mg <sup>2++</sup> 01,80				7,40	09,20
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 0					0
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 04,08					4.08
Total	0.35	0,00	09,40	14,45	

#### 5.10.1. Quantités et ordre de dissolution des sels de la solution nutritive T1 :

- Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 8.60 × 71.02 = 610.77 mg/l
  - CaCl<sub>2</sub> = 6.45 × 73.51 = 463.05 mg /l
  - MgCl<sub>2</sub> = 7.40 × 101.65 = 752.21mg /l
- } Total = 2259.93 mg/l

On remarque à travers cette composition qu'il y a trop de Na<sup>+</sup>, Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup> et de Cl<sup>-</sup>, par contre on enregistre un manque de K<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> et PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>.

En pratique les eaux salines d'origines diverses n'étant pas disponibles en volume suffisant pour être expérimentées à Blida. Il a fallu les reconstituer à partir de l'eau de Blida. De façon pratique, cette reconstitution ne peut être à l'identique si l'on veut respecter un pH final de 5,8. Par conversion, on se base donc à respecter les concentrations en cations et à admettre une légère variation de la concentration en chlorures et sulfates.

La reconstitution a été réalisée comme suit:

-En prenant en compte les éléments minéraux déjà présents dans l'eau de Blida (anions et cations).

-En apportant les éléments manquants afin d'avoir un total anion et cation le plus proche possible de l'analyse initiale.

La correction de cette eau saline naturelle (T<sub>1</sub>) représente le deuxième traitement (T<sub>2</sub>C) utilisé dans notre essai

**Tableau N°17** : Eau d'oued Chélif corrigé, reconstituée avec l'eau de Blida T<sub>1</sub>C où le sodium est lié aux sulfates et le magnésium est lié aux chlorures (pH = 5.78) :

Eau de Blida	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 0,35	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> 0,00	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 0,80	Cl <sup>-</sup> 0,60	Total
K <sup>+</sup> 0,00	4.35				4.35
Na <sup>+</sup> 01,30			8,60		09,90
Ca <sup>++</sup> 02,80	1.50			6,45	09,25
Mg <sup>2++</sup> 01,80				7,40	09,20
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 0	1.80				1.80
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 04,08	2.20	1.10			6,51
Total	10.20	3.30	09,40	14,45	

#### 5.10.2. Quantités et ordre de dissolution des sels de la solution nutritive T<sub>1</sub>C :

- KNO<sub>3</sub> = 4.35 × 101.10 = 439.78mg/l
  - Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 8.60 × 71.02 = 610.77 mg/l
  - Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> = 1.50 × 118.07 = 177.10 mg/l
  - CaCl<sub>2</sub> = 6.45 × 73.51 = 463.05 mg /l
  - Mgcl<sub>2</sub> = 7.40 × 101.65 = 752.21 mg/l
  - NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> = 1.80 × 80.40 = 144.07mg/l
- } Total = 3031.96 mg/l

**Tableau N°18:** Eau d'oued Chélif reconstituée avec l'eau Blida (T<sub>2</sub>) où le sodium est lié aux chlorures et le magnésium est lié aux sulfates (pH =7,40):

Eau de Blida	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 0.35	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> 0	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 0.80	Cl <sup>-</sup> 0.60	Total
K <sup>+</sup> 0					0
Na <sup>+</sup> 1.3				8.60	9.90
Ca <sup>++</sup> 2.8				6.45	9.25
Mg <sup>2++</sup> 1.8			7.40		9.20
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 0					0
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 4.08					4.08
Total	0.35	0	8.20	15.65	

### 5.10.3. Quantités et ordre de dissolution des sels de la solution nutritive T2 :

- NaCl = 8.60 × 58.44 = 502.58 mg/l
  - CaCl<sub>2</sub> = 6.45 × 73.51 = 474.13 mg /l
  - MgSO<sub>4</sub> = 7.40 × 123.24 = 911.97 mg /l
- } Total = 2322.76 mg/l

**Tableau N°19:** Eau d'oued Chélif corrigé reconstituée avec l'eau Blida (T<sub>2</sub>C) où le sodium est lié aux chlorures et le magnésium est lié aux sulfates (pH =5.80):

Eau de Blida	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 0.35	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> 0	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 0.80	Cl <sup>-</sup> 0.60	Total
K <sup>+</sup> 0	4.35				4.35
Na <sup>+</sup> 1.3				8.60	9.90
Ca <sup>++</sup> 2.8	1.50			6.45	9.25
Mg <sup>2++</sup> 1.8			7.40		9.20
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 0	1.80				1.80
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 4.08	2.20	1.10			3.30
Total	10.20	3.30	8.20	14.15	

#### 5.10.4. Quantités et ordre de dissolution des sels de la solution nutritive

T<sub>2</sub>C :

- $\text{KNO}_3 = 4.35 \times 101.10 = 439.78 \text{ mg/l}$
  - $\text{NaCl} = 8.60 \times 58.44 = 502.58 \text{ mg/l}$
  - $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 = 1.50 \times 118.07 = 177.10 \text{ mg/l}$
  - $\text{CaCl}_2 = 6.45 \times 73.51 = 474.13 \text{ mg/l}$
  - $\text{MgSO}_4 = 7.40 \times 123.24 = 911.97 \text{ mg/l}$
  - $\text{NH}_4\text{NO}_3 = 1.80 \times 80.40 = 144.07 \text{ mg/l}$
- Total = 3083.53 mg/l

**Tableau N°20 :** Eau d'oued Chélif reconstituée avec l'eau Blida (T<sub>3</sub>) où le sodium et le magnésium sont liés en fraction avec les chlorures et aux sulfates (pH =7,37) :

Eau de Blida	$\text{NO}_3^-$	$\text{PO}_4^{3-}$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^-$	Total
	0.35	0	0.80	0.60	
K+					0
0					
Na <sup>+</sup>			4,30	4,30	09,90
1.3					
Ca <sup>++</sup>				6.45	09,25
2.8					
Mg <sup>2++</sup>			4,30	3,10	09,20
1.8					
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>					0
0					
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>					6,51
4.08					
Total	0.35	0,00	09,40	14,45	

#### 5.10.5. Quantités et ordre de dissolution des sels de la solution nutritive T<sub>3</sub> :

- $\text{Na}_2\text{SO}_4 = 4.30 \times 71.02 = 305.38 \text{ mg/l}$
  - $\text{NaCl} = 4.30 \times 58.44 = 251.29 \text{ mg/l}$
  - $\text{CaCl}_2 = 6.45 \times 73.51 = 463.05 \text{ mg/l}$
  - $\text{MgSO}_4 = 4.30 \times 123.24 = 529.93 \text{ mg/l}$
  - $\text{MgCl}_2 = 3.10 \times 101.65 = 315.11 \text{ mg/l}$
- Total = 2298.66 mg/l

**Tableau N°21** : Eau d'oued Chélif corrigée reconstituée avec l'eau Blida (T<sub>3</sub>C) où le sodium et le magnésium sont liés en fraction avec les chlorures et aux sulfates (pH =5,87) :

Eau de Blida	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Total
	0.35	0	0.80	0.60	
K <sup>+</sup> 0	5.85				5.85
Na <sup>+</sup> 1.3			4,30	4,30	09,90
Ca <sup>++</sup> 2.8				6.45	09,25
Mg <sup>2++</sup> 1.8			4,30	3,10	09,20
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 0	1.80				1.80
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 4.08	2.20	1.10			6,51
Total	10.20	3.30	09,40	14,45	

#### 5.10.6. Quantités et ordre de dissolution des sels de la solution nutritive T<sub>3</sub>C :

- KNO<sub>3</sub> = 5.85 × 101.10 = 591.43mg/l
  - Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 4.30 × 71.02 = 305.38 mg/l
  - NaCl = 4.30 × 58.44 = 251.29 mg/l
  - CaCl<sub>2</sub> = 6.45 × 73.51 = 474.13 mg /l
  - MgSO<sub>4</sub> = 4.30 × 123.24 = 529.93mg/l
  - Mgcl<sub>2</sub> = 3.10 × 101.65 = 315.11 mg /l
  - NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> = 1.80 × 80.40 = 144.07mg/l
- } Total = 3045.24 mg/l

Les différents traitements ont été élaborés à partir des solutions mères de macroéléments et des macroéléments puis diluée au moment de la préparation de la solution prête à l'utilisation.

Un certain ordre de dissolution est respecté afin d'éviter toute précipitation et ceci en commençant par les produits à fonction acide et les plus solubles, en suite en rajoute au fur et mesure les autres produits.

En dernier lieu, nous avons ajouté les solutions d'oligoéléments A et B solutions complémentaires d'oligoéléments préconisées par [124]. Le contrôle de pH de la conductivité électrique est obligatoire après chaque préparation.

**Tableau N°22 : Composition globale des solutions nutritives salines et corrigées en éléments minéraux (mg/ l)**

Produit	S.M.C [g/l]	T1 [ml]	T1C [ml]	T2 [ml]	T2C [ml]	T3 [ml]	T3C [ml]	T4 [ml]
HNO <sub>3</sub>	-	-	22.68	-	22.68	-	22.68	22.68
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	-	-	13.68	-	13.68	-	13.68	13.68
KNO <sub>3</sub>	118.20 [200]	-	439.78	-	439.78	-	591.43	358.90
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	28.81 [200]	-	144.07	-	144.07	-	-	144.07
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	54.31 [200]	-	177.10	-	177.10	-	144.07	271.56
CaCl <sub>2</sub>	94.82 [200]	474.13	474.13	474.13	474.13	474.13	474.13	-
Mg Cl <sub>2</sub>	150.44 [200]	752.21	752.21	-	-	315.11	315.11	-
MgSO <sub>4</sub>	182.39 [200]	-	-	911.97	911.97	529.93	529.93	-
NaCl	100.51 [200]	-	-	502.58	502.58	251.29	251.29	-
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	122.00 [200]	610.77	610.77	-	-	305.38	305.38	-
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	12.19 [200]	-	-	-	-	-	-	60.99
Mg SO <sub>4</sub>	89.07 [200]	-	-	-	-	-	-	-
Oligoéléments	48.00	-	0.1ml	-	0.1ml	-	0.1ml	0.1ml
Fer	2.00	-	5ml	-	5ml	-	5ml	5ml

### 5.11. Entretien de la culture:

La culture de la tomate a nécessité des opérations d'entretien suivantes:

#### 5.11.1. Irrigation:

Le système d'irrigation adopté est celui de la percolation à circuit ouvert permettant l'évacuation de l'eau en excès.

Il est important de noter qu'en hors-sol, il est recommandé de connaître les besoins journaliers en eau des cultures, afin de pouvoir rationaliser les besoins selon les stades de développement du végétal et ce pour éviter les déficits et les éventuels excès de solution nutritive.

Le tableau ci-dessous montre les doses et les fréquences apportées pendant la période d'expérimentation.

**Tableau N°23:** Doses et fréquence nécessaires pour la culture de tomate

Dates	Stade végétatif	La dose d'irrigation	La fréquence
30.11.2010 au 20.12.2010	Germination au stade cinq feuilles	20ml	3fois / jours
21.12.2011 au 15.01.2011	Stade cinq feuilles au début floraison	40ml	3fois / jours
16.01.2011 au 10.02.2011	Début floraison au début nouaison	60ml	3fois / jours
11.02.2011 au 15.03.2011	Début nouaison à la pleine fructification	80ml	4fois / jours
16.03.2011 au 20.04.2011	Stade maturation des fruits	125ml	5fois / jours

### 5.11.2. Les traitements phytosanitaires :

Au cours de l'expérimentation, nous avons effectué des traitements préventifs pour écarter toute attaque cryptogamique ou d'insectes nuisibles contre les plantes selon le tableau N°24.

**Tableau N°24:** Programme de traitements phytosanitaires réalisés:

Dates	Produit	Matière active	Désignation	Dose	fréquence du traitement
02.02.07	Duresban	Chlorpyriphos-éthyle (50g/kg)	Traitement préventif contre les insectes	3 g / l	1 jour
17.02.07	Medomyl	Mancozeb 64% Metaloxyl 8%	Traitement préventif contre les maladies cryptogamiques	3 g / l	1 jour

### 5.11.3. Palissage:

Vue que la variété de tomate utilisée dans notre expérimentation est une variété à croissance indéterminée donc, à un moment donné on remarqué que les plantes avaient tendance à se recourber ce qui nous a permis de placer des tuteurs à la ficelle, permettant de maintenir les plantes dressées.

### 5.11.4. Étêtage :

Cette opération consiste à faire éliminer l'apex (le bourgeon terminal) au dessus de 2<sup>ème</sup> bouquet florale en laissant deux feuilles au dessus du deuxième bouquet.

## 5.12. Dosage des paramètres physiologiques :

### 5.12.1. Dosage de la chlorophylle

La chlorophylle a et b est dosés durant le stade végétatif, sur les feuilles médianes de la tomate, on utilisant 3 répétitions pour chaque traitement et chaque bloc. L'extraction de la chlorophylle a et b est réalisé selon la méthode de [125]. La méthode d'extraction consiste à une macération des feuilles (0.1g) dans 10 ml d'un mélange de l'acétone et de l'éthanol (75 % et 25%) de volume et de (80% et 40%) de concentration. Les feuilles sont coupées en petits morceaux et mises dans les boîtes noires (pour éviter l'oxydation de la chlorophylle par la lumière), 48h plus tard, on procède à la lecture des densités optiques des solutions avec un spectrophotomètre, à trois longueurs d'ondes : (470, 645 et 663 nm).

La détermination des teneurs réalisée selon les formules :

- Chl a ( $\mu\text{g/g MF}$ ) =  $12,7 \times \text{DO}_{(663)} - 2,59 \times \text{DO}_{(645)} \times V / (1000 \times W)$ .
- Chl b ( $\mu\text{g/g MF}$ ) =  $22,9 \times \text{DO}_{(645)} - 4,68 \times \text{DO}_{(663)} \times V / (1000 \times W)$ .
- Chl(c) ( $\mu\text{g/g MF}$ ) =  $1000 \text{DO}_{(470)} - [1.82 \text{Chl a} - 85.02 \text{Chl b}] / 100$

V : volume solution extraite et W le poids de matière fraîche de l'échantillon

### 5.12.2. Dosage des sucres solubles

Nous avons procédé au dosage des sucres solubles dans les feuilles des plantes selon la méthode de [126]. Pour l'extraction des sucres solubles :

Mètre 100 mg de matière fraîche végétale dans des tubes à essai puis ajouter 2 ml d'éthanol à 80%. Laisser les tubes fermés au repos pendant 48h. Faire évaporer l'alcool en mettant les tubes à essai dans un bain Marie à 70°C.

Après refroidissement, on ajoute 20 ml d'eau distillée dans chaque tube à essai.

Prendre 1 ml de la solution et ajouter 1 ml de phénol à 5 % et bien agiter.

Ajouté 5 ml d'acide sulfurique concentré, dans chaque tube à essai puis les passer au vortex, puis les laisser au repos pendant 10mn puis les passer au bain Marie pendant 15 mn à 30°C. Procéder à la lecture au spectrophotomètre à la longueur d'onde de 490 nm.

La détermination de la teneur des sucres solubles est réalisée selon la formule:

$$\text{Sucres solubles } (\mu\text{g/g MS}) = \text{DO}_{490} \times 1.657$$

### 5.12.3. Dosage de la proline

La proline est dosée selon la technique utilisée par [127]. Le principe est la quantification de la réaction proline-ninhydrine par mesure spectrophotométrique. 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 :

On met 100 mg de matière fraîche végétale dans des tubes à essai et on ajoute 2 ml de Méthanol à 40 %. Les tubes couverts (pour éviter la volatilisation de l'alcool) sont portés à l'ébullition au bain-marie à 85 °C pendant 60 min.

Après refroidissement, 1 ml de la solution a été prélevé de chaque tube et mis dans de nouveaux tubes auxquels, nous avons ajouté 1 ml d'acide acétique et 25 mg de ninhydrine.

Ensuite, on ajoute, dans chaque tube, 1 ml d'un mélange contenant;

120 ml d'eau distillée,

300 ml d'acide acétique,

80 ml d'acide orthophosphorique

On porte les tubes à essai à ébullition au bain Marie durant 30 min.

Après refroidissement des solutions, on ajoute 5 ml de toluène dans chaque tube.

Après agitation au vortex deux phases apparaissent. On prélève la phase supérieure à la qu'elle on ajoute 5 mg du sulfate de sodium, puis on les laisse au repos pendant 48h.

On procède à la lecture de la densité optique des échantillons avec le spectrophotomètre à la longueur d'onde de 528 nm.

La détermination de la teneur de la proline est réalisée selon la formule:

$$\text{Proline } (\mu\text{g/g MF}) = \text{DO}_{528} \times 0.62$$

### 5.13. Dosage des paramètres technologiques

#### 5.13.1. Dosage de la vitamine « c » :

La teneur en vitamine « C » dans les fruits de tomate est calculée selon la méthode de [128] comme suite :

Une quantité de 10g de fruits frais est réduite en pâte mise en présence de 50ml d'acide chlorhydrique (Hcl 2%) puis laisser en repos pendant 10 minutes. Faire filtrer le mélange dans un bicher de 100 ml.

La détermination de la vitamine « c » est passée par deux étapes :

#### 1<sup>ère</sup> Etape :

- ✓ Prélever 10ml d'extrais filtrée et mettre dans un erlenmayer, ajouter 30ml d'eau distillé, on ajoute aussi 1ml de solution d'iodure de potassium (KI 1%) en fin on additionne 2ml de solution d'amidon 5%.
- ✓ La solution préparée est titrée à l'iodate de potassium (KINO3 N/1000) jusqu'à l'apparition d'une coloration bleu
- ✓ Enregistrer le volume en ml d'iodure de potassium (KI) utilisé pour le titrage

#### 2<sup>ème</sup> Etape :

On réalise un témoin dans les mêmes conditions, les 10 ml d'extrais sont remplacées par une quantité égale d'acide chlorhydrique 2%

#### Les calcules :

La teneur en vitamine « C » est calculée selon la méthode de [128]

$$X = \frac{N.V_1 - 0.88}{G.V_2} \times 100 \quad \text{ou}$$

- X : mg d'acide ascorbique /g de produit a l'analyse
- N : nombre d'iodate de potassium résultant de la différence entre le 1<sup>er</sup> titrage et le titrage témoin
- V<sub>1</sub> : volume total d'extrait obtenu pour analyse
- V<sub>2</sub> : volume initial d'extrait soumis à l'analyse
- G : quantité de produit analysé

### 5.13.2. Détermination de l'extrait sec :

On opérant cette dessiccation (à 70°C) jusqu'à la stabilité du poids sec. On obtient des produits en apparence secs,

Ramener la valeur obtenue à celle du produit totalement desséché, ce qui revient à la réduire de  $1/10^{\text{ème}}$  de la valeur.

paramètres	La valeur
Capsule vide (tare)	
Tare + échantillon frais	
Tare + échantillon sec	
Extrais sec primaire	
$1/10^{\text{ème}}$	
Extrais sec secondaire	
Poids sec en % du poids frais	

### 5.13.3. Détermination de l'acidité titrable :

- Mode d'opérateur :**
- Moudre de la tomate
  - Prendre 5 à 30g de jus
  - Ajouter 100ml d'eau distillé bouillante
  - Filtrer et compléter à 200ml
  - Centrifuger la solution finale obtenue

- Dosage :**
- Prélever 100ml du surnageant
  - Ajouter 3 à 4 gouttes de phénolphtaléine
  - Titrer à la soude (NaOH) N/10

- Expression des résultats :**
- Les calculs :**
- $N_1V_1 = N_2V_2$
- En g d'acide citrique / 100g de jus
  - En g d'acide citrique / kg de fruit frais
  - En g d'acide malique / 100g de jus
  - En g d'acide malique / kg de fruit frais

$$N_1 = \frac{N_2V_2}{V_1} \quad \text{ou}$$

- $N_2$  : la normalité de la soude utilisée pour le titrage = 0.1
- Volume de soude versé en [ml] pendant le titrage
- Volume de surnageant prélevée = 100 ml

#### 5.13.4. Dosage des sucres dans les fruits de tomate :

La détermination de ce paramètre est réalisée à l'aide d'un réfractomètre. Le principe de cette opération est basé sur la mise d'une gouttelette de jus de tomate dans l'appareil puis passer à la lecture directe

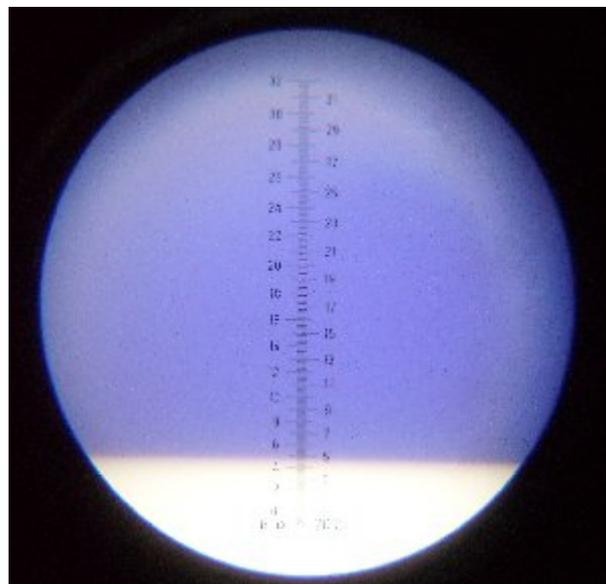


Figure N°12 : Aspect général d'un réfractomètre et la manière de lecture

## CHAPITRE 6 RESULTATS ET DISCUSSIONS

Pour mettre en évidence la réponse des plantes de tomate cultivées hors sol et soumise au stress salin ; nous avons effectuée des mesures biométriques, dosages du paramètres physiologiques, physicochimiques, et des paramètres technologiques et en fin nous avons calculés le bilan d'absorption hydrominérale au cour de la production.

### 6.1. Paramètres de croissance :

#### 6.1.1. Aspect général des plantes :



**Figure N°13 :** Aspect général des plants de tomate alimentés par les traitements salins corrigés comparés au standard (T<sub>4</sub>)



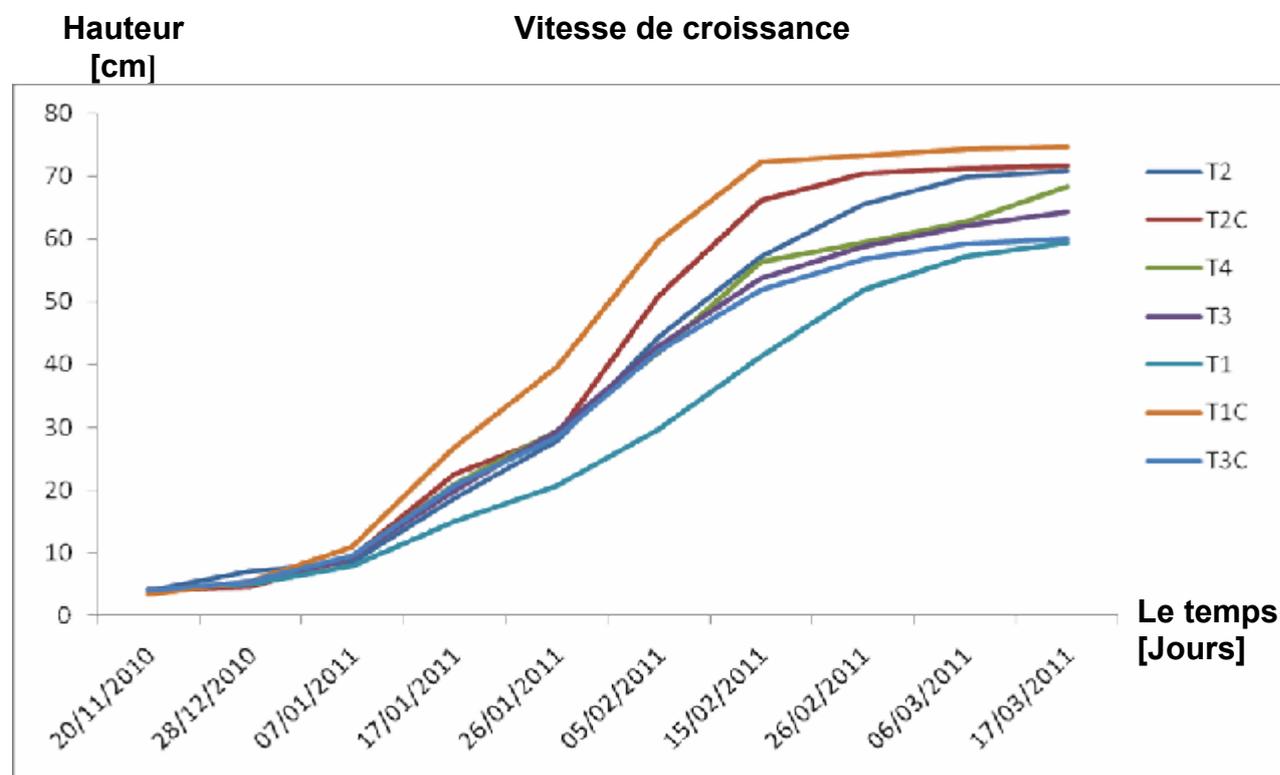
**Figure N°14 :** Aspect général des plants de tomate alimentés par les traitements salins naturels comparés au standard (T<sub>4</sub>)



**Figure N°15** : la comparaison entre les plantes irriguées par le traitement salin naturel et sa correction respectivement (T<sub>1</sub>-T<sub>1C</sub>), (T<sub>2</sub>-T<sub>2C</sub>) et (T<sub>3</sub>-T<sub>3C</sub>)

### 6.1.2. La vitesse de croissance des plantes :

La courbe ci-dessous montre l'évolution de la vitesse de croissance des plantes de tomate après l'application des différents traitements (figure 16).



**Figure N°16 :** Vitesse de croissance des plants ( cm/j)

Selon la figure N°16, on constate que la vitesse de croissance pour tous les traitements passe par un pallier stationnaire qui commence à compter de la date de début des traitements (20-11-2010) jusqu'à la date de (07-01-2011). On observe également une légère augmentation de la vitesse de croissance pour l'ensemble des traitements qui débute à partir de (07-01-2011). Cette phase stationnaire est expliquée par la période d'adaptation des jeunes plantules dans les milieux nutritifs correspondants.

Dès la date de 07-01-2011, on remarque clairement qu'il existe deux courbes, dont celui des solutions salines naturelles ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ), et celui des solutions salines corrigées. Aussi, on remarque qu'après du date de 26-01-2011, la vitesse de croissance des plants de tomate alimentés par les solutions ( $T_{1C}$ ,  $T_{2C}$ ,  $T_{3C}$ ) et le traitement standard ( $T_4$ ) devient très importante aux alentours de 30cm à 70cm. Ceci peut être expliqué par la présence des éléments nutritifs favorables à la croissance des plantes notamment l'azote, le phosphore le potassium et oligo-éléments, ainsi

que l'équilibre parfait des milieux alimentaires et surtout le pH qui est compris entre 5.5 et 5.8 qui est considéré comme étant un facteur déterminant dans l'absorption hydrominérale des plantes dans un environnement saline.

Il est nécessaire d'ajouter que l'azote est un élément indispensable à la multiplication cellulaire puisqu'il intervient dans la composition du noyau, donc il favorise l'augmentation de la croissance des végétaux et que les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) facilitent la pénétration des cations  $\text{K}^+$  et  $\text{Ca}^{2+}$  par synergisme, ce qui améliore la photosynthèse.

Par contre, les solutions salines naturelles ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ) présentent une vitesse de croissance moins importante que celle observée chez les traitements salins corrigés. Le maximum est à 60cm. Ceci est expliqué par le déséquilibre ionique, et des carences en éléments fertilisants (macro et micro éléments), tels que l'azote, le phosphore et également le potassium dont son absence ralentit la croissance des plantes.

L'étêtage des plantes est réalisé au stade deux (02) bouquets floraux en laissant deux feuilles au dessus du 2<sup>ème</sup> bouquet floral. La variété de tomate utilisée dans notre expérimentation est une variété à croissance indéterminée. Cette technique culturelle pratiquée explique l'arrêt de la vitesse de croissance pour les traitements salins corrigés ( $T_1C$ ,  $T_2C$ ) en premier temps (à partir de 15-02-2011) suivie par les traitements ( $T_3C$ ,  $T_4$ ) et ce à compter du (26-02-2011). Par contre, les traitements salins naturels ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ) n'ont jamais atteint le stade deux bouquets floraux, ce qui explique le pallier de la figure N°16.

### 6.1.3. Hauteur finale des plantes [cm]:

La hauteur des tiges a été mesurée au moment de la coupe finale à partir de collet jusqu'à l'apex au niveau de chaque plant (tableau 25).

**Tableau N°25:** Hauteur moyenne des tiges en (cm):

<b>T1</b>	<b>T1C</b>	<b>T2</b>	<b>T2C</b>	<b>T3</b>	<b>T3C</b>	<b>T4</b>
55.45	76.95	62.67	69.10	56.00	68.20	67.75
±	±	±	±	±	±	±
4.17	3.18	1.87	1.29	4.00	0.79	0.59
c	a	bc	Ab	c	ab	ab

L'analyse de la variance a révélé une différence très hautement significative ( $P < 0,001$ ). Les résultats obtenus durant la coupe finale révèlent qu'il y a une augmentation de la hauteur des plants au niveau des solutions salines corrigées ( $T_1C$ ,  $T_3C$ ,  $T_4$  et  $T_2C$ ) et ce par rapport aux autres traitements salins naturels.

La meilleure performance a été enregistrée au niveau du traitement  $T_1C$ , suivi par les traitements ( $T_3C$ ,  $T_4$  et  $T_2C$ ). Ceci peut être expliqué par l'équilibre ionique parfait dans la solution saline corrigée et de sa richesse en éléments fertilisants, notamment la présence de l'élément d'azote, du phosphore, du potassium et la présence des oligoéléments.

Le test de Newman-Keuls ( $\alpha = 5\%$ ) classe ces traitements salins corrigés en deux groupes homogènes à savoir le groupe (a) et (ab).

Par contre, les solutions salines naturelles ( $T_2$ ,  $T_3$  et  $T_1$ ) présentent les hauteurs des plants les plus faibles par rapport aux autres traitements testés. Elles forment des groupes homogènes à savoir (bc) et (c). Ces faibles hauteurs peuvent être expliquées comme suite:

- La présence d'une grande quantité de sel dans les solutions d'irrigation provoque la réduction de la division et de l'allongement cellulaire, et par conséquent une diminution de la croissance de la plante ;
- Un pH alcalin défavorable pour une meilleure absorption hydrominérale des plantes dans ces milieux.

Des résultats similaires ont été rapportés par [128], qui confirment que les deux principales manifestations de la salinité sont la réduction de la taille des plantes, et l'apparition de nécroses foliaires aux concentrations plus élevées, signes d'une toxicité par excès d'accumulation de sel dans les feuilles.

#### **6.1.4. Diamètre des tiges:**

La mesure du diamètre des tiges a été effectuée au moment de la coupe finale à l'aide d'un pied à coulisse au niveau du collet de chaque plant (tableau 26).

**Tableau N°26:** Diamètre moyen des tiges en (cm):

<b>T1</b>	<b>T1C</b>	<b>T2</b>	<b>T2C</b>	<b>T3</b>	<b>T3C</b>	<b>T4</b>
0.61	1.00	0.59	1.00	0.64	0.98	1.02
±	±	±	±	±	±	±
0.31	0.48	0.19	0.74	0.05	0.35	0.20
b	a	b	a	b	a	a

L'analyse de la variance a révélé une différence très hautement significative ( $P < 0,001$ ). Les mesures effectuées au moment de la coupe finale ont montré que les solutions salines corrigées et le témoin à savoir ( $T_4$ ,  $T_3C$ ,  $T_2C$ ,  $T_1C$ ) ont enregistré les meilleurs diamètres par rapport aux solutions salines non corrigées. Le meilleur diamètre est obtenu au niveau des plants alimentés par la solution nutritif standard ( $T_4$ ) avec une valeur de 1.02cm.

Le test de Newman-Keuls ( $\alpha = 5\%$ ) classe les solutions salines naturelles non corrigées ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ) dans le même groupe homogène (b) autrement dit les résultats sont statistiquement homogènes et dont le diamètre le plus faible semble être celui du ( $T_2$ ) qui est égal à 0.59cm

Les carences en éléments essentiels des milieux salins naturels provoquent d'abord l'arrêt de la croissance des tissus jeunes, puis rapidement cet état de déficience s'uniformise dans les différents organes. Il en résulte des troubles des fonctions de la plante, entraînant inévitablement un ralentissement et un retard de croissance avec apparition de phénomène de plasmolyse aboutissant ainsi à la formation de tiges moins rigides et donc peu développées.

#### **6.1.5. Nombre de feuilles :**

Ce comptage est réalisé au niveau de chaque plant au moment de la coupe finale (tableau 27).

**Tableau N°27:** Nombre des feuilles :

<b>T1</b>	<b>T1C</b>	<b>T2</b>	<b>T2C</b>	<b>T3</b>	<b>T3C</b>	<b>T4</b>
10.05	11.55	10.35	11.80	10.50	11.45	12.25
±	±	±	±	±	±	±
0.21	0.21	0.49	0.00	0.42	0.07	0.49
b	a	b	a	b	a	a

L'analyse de la variance a révélé une différence très hautement significative ( $P < 0,001$ ). Pour ce qui est du nombre des feuilles, les meilleures performances sont toujours enregistrées par les solutions salines corrigées ( $T_4$ ,  $T_3C$ ,  $T_2C$ ,  $T_1C$ ) avec un nombre de feuilles le plus élevé dont le traitement témoin ( $T_4$ ) avec 12,25 feuilles, et les solutions salines non corrigées sont classées dans le même groupe homogène (b).

La réduction de la croissance peut être aussi liée à des perturbations des taux des régulateurs de croissance (acide abscissique et cytokinines) induites par le sel, parfois à une réduction de la capacité photosynthétique suite à une diminution de la conductance stomatique de  $CO_2$  sous la contrainte saline (Ben Khaled et al.2003).

Ce résultat confirme le travail de [129], qui ont montré que la salinité provoque la réduction du nombre des feuilles de la tomate.

[130], montre que ces résultats est du au calcium qui joue un rôle d'antagoniste en empêchant l'absorption du magnésium, du potassium et même du phosphore et d'autres oligo-éléments tel que le zinc, le fer et le manganèse, se traduisant ainsi par un arrêt de photosynthèse et aboutissant au phénomène de chlorose. Ainsi, on observe une réduction du nombre de feuilles au niveau des plantes.

#### 6.1.6. Biomasse fraîche totale [g]:

Le poids frais total est pesé au niveau de chaque plant au moment de la coupe finale (tableau 28).

**Tableau N°28:** Biomasse fraîche totale [g]:

T1	T1C	T2	T2C	T3	T3C	T4
31.48	261.22	23.80	318.72	41.51	264.71	248.26
±	±	±	±	±	±	±
0.23	2.60	0.09	3.73	5.52	2.62	1.46
c	b	c	a	c	b	b

L'analyse de la variance montre qu'il y a une différence très hautement significative entre les différentes moyennes mesurées de la biomasse fraîche aérienne ce qui met en évidence l'influence des milieux alimentaires sur le paramètre mesuré. En effet, le test de Newman et keuls au seuil  $\alpha = 5\%$  fait ressortir trois (03) groupes homogènes. Le groupe (a) dominant est représenté par les moyennes mesurées chez les individus qui ont reçu le traitement  $T_2C$  où le Sodium ( $Na^+$ ) et lié

aux Chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) et le Magnésium ( $\text{Mg}^{+2}$ ) et lié aux sulfates ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) avec une valeur de 318.72 g.

Ce même test classe les autres solutions salines corrigées et le témoin ( $T_1C$ ,  $T_3C$  et  $T_4$ ) dans le deuxième groupe (b) donc les résultats sont statistiquement homogènes avec une biomasse fraîche totale la plus faible au niveau ( $T_1C$ ) qui est égale à 261.22g.

En effet, la correction de l'eau saline naturelle a un effet bénéfique sur la croissance de la tomate, par ce qu'elle fournit tous les éléments nécessaires aux besoins des plantes à des proportions convenables.

Les solutions salines non corrigées à savoir ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ), ont donné respectivement, des valeurs faibles du poids frais total par apport aux autres traitements salins corrigés (31.48g, 23.80g, 41.51g). Ceci peut être expliqué par le fait que la diminution de la croissance est une réponse à la déshydratation. Elle contribue à la conservation des ressources en eau, ce qui permet la survie de la plante.

[131], confirme que dans un milieu saumâtre (milieu riche en sels), la répartition spatiale des racines est réduite et le développement de ces organes est inhibé.

#### 6.1.7. Biomasse fraîche des feuilles[g]:

Ce paramètre biométrique est pesé au niveau de chaque plant au moment de la coupe finale (Tableau 29).

**Tableau N°29:** Biomasse fraîche des feuilles [g]:

<b>T1</b>	<b>T1C</b>	<b>T2</b>	<b>T2C</b>	<b>T3</b>	<b>T3C</b>	<b>T4</b>
16.58	202.98	10.40	257.17	24.99	204.42	185.10
±	±	±	±	±	±	±
1.12	6.09	0.01	13.60	4.48	2.62	2.93
c	b	c	a	c	b	b

Selon les résultats qui sont enregistrés dans le tableau N°27, on remarque que les traitements testés dans notre expérimentation que ce soit salins naturels ou salins corrigés exercent un effet significatif sur la biomasse fraîche des feuilles durant tout le stade de développement des plantes.

Les plantes irriguées par les solutions salines naturelles ( $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$ ), présentent une biomasse fraîche des feuilles faible quelque soit le type du sel testé. En effet, le test de Newman et keuls au seuil  $\alpha = 5\%$  classe dans le troisième groupe homogène

(c) les eaux précitées. Ceci peut être expliqué par le manque des éléments essentiels pour le développement et la croissance tels que : N, P, K, Mg, Fe,...

Selon [60], les ions de sodium et de chlorite peuvent être absorbés par les racines et s'accumuler dans les feuilles. Dès lors, ces ions peuvent provoquer les brûlures et le jaunissement prématuré des feuilles. En revanche, la correction de l'eau saline manifeste un développement important de la biomasse fraîche des feuilles issu d'un équilibre ionique parfait du milieu alimentaire.

#### 6.1.8. Biomasse fraîche des tiges [g]:

Ce paramètre biométrique est pesé au niveau de chaque plant au moment de la coupe finale (Tableau 30).

**Tableau N°30:** Biomasse fraîche des tiges [g]:

<b>T1</b>	<b>T1C</b>	<b>T2</b>	<b>T2C</b>	<b>T3</b>	<b>T3C</b>	<b>T4</b>
14.86	58.23	13.40	64.26	16.52	60.28	63.21
±	±	±	±	±	±	±
0.84	3.49	0.06	2.93	1.05	5.38	4.34
b	a	b	a	b	a	a

L'analyse de la variance montre qu'il y a une différence très hautement significative entre les différentes moyennes mesurées de la biomasse fraîche des tiges ce qui met en évidence l'influence des différents sels dans les solutions d'irrigations testé. En effet, le test de Newman et keuls au seuil  $\alpha = 5\%$  fait ressortir deux (02) groupes homogènes :

La meilleure performance a été enregistrée au niveau des traitements ( $T_4$ ,  $T_3C$ ,  $T_2C$ ,  $T_1C$ ) avec la valeur la plus élevée est celle donnée par le traitement ( $T_2C$ ) qui correspond à 64.26g.

De nombreux travaux ont mis en évidence la contribution de la correction des eaux salines dans l'amélioration de l'alimentation minérale des plantes avec l'apport essentiellement du le fer, du phosphore et du manganèse qui se traduit par une meilleure structure physiologique des plantes alimentées par ces solutions nutritives.

Le groupe (b) est représenté par les moyennes mesurées chez les individus qui ont reçu les traitements salins naturels ( $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$ ), avec une biomasse fraîche des tiges la plus faible qui est enregistrée chez le traitement ( $T_2$ ) et qui est de 13.40g.

Cette solution d'irrigation saline est composée de combinaison des ions de sodium avec les chlorures ( $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ ) et les ions de magnésium avec les sulfates ( $\text{Mg}^{+2}/\text{SO}_4^{-2}$ ).

[128], confirment que la salinité se manifeste par la réduction de la taille des plantes, avec la présence de NaCl dans le milieu, même à faible dose (50 mM), entraînent, après 21 jours de culture, une baisse significative de la matière fraîche et sèche des plantes. La concentration en NaCl qui provoque 50% d'inhibition de la croissance pondérale des plantes est de l'ordre de 75 mM.

### 6.1.9. Biomasse fraîche des racines [g]:

La mesure de la biomasse fraîche des racines a été effectuée au moment de la coupe finale (tableau 31).

**Tableau N°31:** Biomasse fraîche des racines [g]:

T1	T1C	T2	T2C	T3	T3C	T4
10.29	73.19	7.77	108.63	11.17	74.11	88.48
±	±	±	±	±	±	±
5.74	5.24	3.85	2.93	0.10	0.38	1.28
b	a	b	a	b	a	a

La mesure du poids frais racinaire d'après l'analyse de la variance a révélé une différence très hautement significative ( $p < 0.001$ ). Les poids les plus élevés sont enregistrés par les solutions salines corrigées et le témoin ( $T_4$ ,  $T_3C$ ,  $T_2C$ ,  $T_1C$ ) avec une meilleure performance de 108.63g au niveau de ( $T_2C$ ).

Parmi les solutions salines naturelles, qui sont classées statistiquement dans le deuxième groupe homogène (b), c'est la solution  $T_3$  (solution saline où on a combiné les ions sodium ( $\text{Na}^+$ ) avec les chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) et les sulfates ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) qui enregistre le paramètre mesuré le plus élevé (11.17g).

Dans ce contexte, [128] ont noté que sur le plan nutritionnel, la culture sur sel entraîne un enrichissement des racines en  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{SO}_4^{-2}$  avec généralement un excès d'accumulation du cation par rapport à l'anion. La seconde manifestation du stress salin est une baisse significative des teneurs en  $\text{K}^+$  dans les racines, aux concentrations en NaCl supérieures à 50 mM, se traduisant probablement une restriction de l'approvisionnement de la plante en  $\text{K}^+$ .

[130], note également que la concentration élevée du sel dans le sol peut augmenter la pression osmotique qui devient égale ou dépasse celle de suc

cellulaire des racines. Dans ce cas, le végétal subit un flétrissement temporaire qui peut devenir permanent en cas de déficit en eau prolongé.

#### 6.1.10. Longueur des racines [cm]:

La longueur racinaire a été mesurée effectuée au moment de la coupe finale après avoir enlevé les racines des plantes. Elles sont secouées et lavées pour éliminer le gravier collet (tableau 32).

**Tableau N°32:** La longueur des racines [g]:

<b>T1</b>	<b>T1C</b>	<b>T2</b>	<b>T2C</b>	<b>T3</b>	<b>T3C</b>	<b>T4</b>
26.55	37.45	22.05	37.72	25.15	37.35	36.85
±	±	±	±	±	±	±
2.62	1.06	2.90	0.60	0.49	1.20	1.34
b	a	b	a	b	a	a

L'analyse de la variance montre qu'il y a une différence très hautement significative entre les différentes moyennes mesurées de la longueur des racines. Ceci met en évidence l'influence des sels au niveau des différentes solutions d'irrigations. En effet, le test de Newman et keuls au seuil  $\alpha = 5\%$  fait ressortir deux groupes homogènes. Le groupe (a) dominant est représenté par les moyennes mesurées chez les individus qui ont reçu les traitements ( $T_4$ ,  $T_3C$ ,  $T_2C$ ,  $T_1C$ ) avec une valeur la plus élevée 37.72g enregistré chez le traitement ( $T_2C$ ). Ceci peut être expliqué par l'équilibre ionique parfait dans les solutions salines corrigées et leurs richesses en éléments fertilisants, notamment la présence de macroéléments tels que l'azote, du phosphore, du potassium et ainsi la présence des oligoéléments.

Le deuxième groupe (b) est représenté par les traitements salin naturels ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ) où les résultats sont statistiquement homogènes avec la longueur des racines le plus faible semble être obtenue au niveau du  $T_2$  (22.05cm).

### 6.1.11. Biomasse sèche totale [g]:

Le poids sec total (feuille+ tige) est présenté dans le tableau 33.

**Tableau N°33:** Biomasse sèche totale [g]:

<b>T1</b>	<b>T1C</b>	<b>T2</b>	<b>T2C</b>	<b>T3</b>	<b>T3C</b>	<b>T4</b>
5.07	35.36	3.89	42.56	5.32	29.26	38.77
±	±	±	±	±	±	±
0.47	2.21	0.09	0.54	0.18	2.00	0.78
e	c	e	a	e	d	b

D'après le tableau 33 ci-dessus. Les données obtenues aussi que la technique d'analyse statistique relative à ce test global F, nous confirme qu'il existe une influence remarquable de la solution nutritive saline corrigée sur la biomasse sèche totale. En effet, le test de Newman et keuls au seuil  $\alpha = 5\%$  fait ressortir quatre groupes homogènes.

Le premier groupe (a) représenté toujours par les traitements salins corrigés (T<sub>2</sub>C) manifeste une valeur qui correspond à 42.56g et qui est onze fois supérieure au dernier groupe homogène (e) représenté par le même traitement mais qui est salin naturelle (T<sub>2</sub>), suivi du 2<sup>ème</sup> groupe (b) représenté par le traitement témoin (T<sub>4</sub>) utilisé dans notre étude comme étant un traitement standard avec une moyenne de 38.77g. Le groupe (e) représenté par les traitements (T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> et T<sub>3</sub>) enregistre les faibles biomasses sèches totales de la partie aérienne. Ceci est expliqué par une conductivité électrique (CE) très élevée, associée à un pH alcalin ce qui cause un déséquilibre ionique des milieux nutritifs et une mauvaise alimentation hydrominérale suite à une pression osmotique très élevée du milieu extérieur.

[57], confirme que la salinité des eaux d'irrigation inhibe la croissance des organes de la partie aérienne ce qui se représente très visiblement sur l'ossature de ces plantes entraînant un faible taux de la biomasse totale produite.

### 6.1.12. Biomasse sèche des feuilles [g]:

Ce paramètre est réalisé après séchage des feuilles dans un étuve à 75°C jusqu'à la stabilité du poids sec de cet organe (tableau 34).

**Tableau N°34:** Biomasse sèche des feuilles [g]:

<b>T1</b>	<b>T1C</b>	<b>T2</b>	<b>T2C</b>	<b>T3</b>	<b>T3C</b>	<b>T4</b>
2.94	24.90	1.67	31.01	2.99	19.51	26.71
±	±	±	±	±	±	±
0.83	2.35	0.04	0.74	0.26	0.59	0.06
d	b	d	a	d	c	b

On peut noter que la solution saline équilibrée (T<sub>2</sub>C) a enregistré une valeur maximale de 31.01g, suivi par les deux solutions d'irrigations corrigées (T<sub>4</sub> et T<sub>1</sub>C) avec des valeurs de (26.71g et 24.90g) respectivement.

Ces biomasses sèches très importantes produites par les plantes qui sont alimentées par les traitements salinés corrigées sont dues essentiellement à la richesse de ces solutions en macros et en micro-éléments. Ainsi, la présence d'un potentiel hydrique (pH) favorable facilitant l'absorption de ces derniers par les plantes de tomate dans ces milieux nutritifs.

Ce résultat confirme le travail de [125], qui a montré que la correction des eaux salines provoque l'augmentation de la biomasse sèche des feuilles de tomate.

Les résultats révélées par les plantes alimentées par les eaux salines naturelles sont classées par le test Newman et keuls au seuil  $\alpha = 5\%$  dans le groupe homogène (d). Ils sont environ de dix fois plus inférieurs à ceux du traitement dominant (T<sub>2</sub>C)

Ainsi selon [60], les ions sodium et de chlorures peuvent être adsorbés par les racines et s'accumuler dans les feuilles. Dès lors, ces ions dans les milieux salins naturels (T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> et T<sub>3</sub>) peuvent provoquer les brûlures et le jaunissement prématuré des feuilles.

### 6.1.13. Biomasse sèche des tiges [g]:

Ce paramètre suit le même principe que le poids sec des feuilles. Il y a eut séchages des tiges dans un étuve à 75°C jusqu'à la stabilité du poids sec de ces organes (tableau 35).

**Tableau N°35** : Biomasse sèche des tiges [g]:

<b>T1</b>	<b>T1C</b>	<b>T2</b>	<b>T2C</b>	<b>T3</b>	<b>T3C</b>	<b>T4</b>
2.15	10.45	2.22	11.55	2.33	9.74	12.26
±	±	±	±	±	±	±
0.40	0.13	0.12	0.20	0.08	1.41	1.12
c	ab	c	ab	c	b	a

Pour ce qui est du poids sec des tiges, les meilleures performances sont enregistrées par la solution standard (T<sub>4</sub>) avec un poids qui correspond à 12.26g, suivi de (T<sub>2</sub>C et T<sub>1</sub>C) avec des valeurs de 11.55g et 10.45g respectivement.

En revanche, les solutions salines naturelles sont classées dans le même groupe homogène (c) où on enregistre des biomasses sèches des tiges les plus faibles. Ainsi on peut noter que le traitement (T<sub>1</sub>) où le sodium est lié aux sulfates et le magnésium (Mg<sup>+2</sup>) combiné aux chlorures (Cl<sup>-</sup>) enregistre la plus faible valeur (2.15g).

On raison de la présence de sels de différentes formes (NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, MgCl<sub>2</sub> et MgSO<sub>4</sub>) dans les solutions d'irrigation testées, la conductivité électrique et le potentiel hydrique de ces dernières sera plus élevées, ce qui manifestent un déséquilibre ionique et une mauvaise alimentation hydrominérale des plantes de tomate dans ces milieux ce qui se traduit par une production de biomasse faible.

[128], confirment que la présence de NaCl dans le milieu, même à faible dose (50 mM), entraîne, après 21 jours de culture, une baisse significative de la matière sèche des plantes, des racines comme des parties aériennes. La concentration en NaCl qui provoque 50% d'inhibition de la croissance pondérale des plantes est de l'ordre de 75 mM soit 4.30g/l.

#### 6.1.14. Biomasse sèche des racines [g]:

La biomasse sèche des racines est représentée dans le tableau 36.

**Tableau N°36** : Biomasse sèche des racines [g]

<b>T1</b>	<b>T1C</b>	<b>T2</b>	<b>T2C</b>	<b>T3</b>	<b>T3C</b>	<b>T4</b>
1.28	8.44	0.86	10.91	1.13	7.89	14.24
±	±	±	±	±	±	±
0.40	2.09	0.08	0.20	0.04	0.07	1.12
b	ab	b	a	b	ab	a

L'analyse de la variance montre qu'il y a une différence très hautement significative entre les différentes moyennes mesurées de la biomasse sèche des racines. En effet, le test de Newman et keuls au seuil  $\alpha = 5\%$  fait ressortir deux groupes homogènes.

Le groupe (a) dominant est représenté par les moyennes mesurées chez les individus qui ont reçu les traitements ( $T_4$  et  $T_2C$ ) avec des valeurs de 14.24g et 10.91g respectivement. Ceci peut être expliqué par la meilleure répartition spatiale des racines suite à l'équilibre ionique des milieux et surtout leur richesse en éléments minéraux indispensables à la croissance racinaire et notamment à l'osmolarité du traitement standard ( $T_4$ ) la plus faibles.

Les deux traitements salins corrigés ( $T_1C$  et  $T_3C$ ) sont classés en groupes (ab) qui révèlent un poids sec des racines moyennes.

La présence des ions de magnésium ( $Mg^{+2}$ ) et de sodium ( $Na^+$ ) liés totalement aux chlorures et aux sulfates respectivement (cas de  $T_1$  et  $T_2$ ) et la liaison de sodium aux chlorures ( $Cl^-$ ) et aux sulfates ( $SO_4^{-2}$ ) en fraction (cas de  $T_3$ ) révèlent les plus faibles biomasses sèches des racines.

#### 6.1.15. La matière sèche totale [%]:

Le taux de la matière sèche totale est calculé par la règle suivante :

$$\text{La matière sèche totale [\%]} = \frac{\text{Poids sec du plant}}{\text{Poids frais total du plant}} \times 100 \text{ et présenté dans le}$$

tableau 37

**Tableau N°37:** La matière sèche totale [%]

<b>T1</b>	<b>T1C</b>	<b>T2</b>	<b>T2C</b>	<b>T3</b>	<b>T3C</b>	<b>T4</b>
16.19	13.52	16.33	13.36	12.42	11.09	15.61
±	±	±	±	±	±	±
1.25	0.71	0.45	0.69	1.29	0.69	0.23
a	abc	a	abc	bc	c	ab

L'analyse de la variance montre qu'il y a une différence significative entre les différentes moyennes mesurées de la matière sèche totale ce qui met en évidence l'influence des sels sur le paramètre mesurée. En effet, le test de Newman et keuls au seuil  $\alpha = 5\%$  fait ressortir cinq groupes homogènes. Le groupe (a) dominant est

représenté par les moyennes mesurées chez les individus qui ont reçu les traitements ( $T_1$  et  $T_2$ ) avec une valeur de 16.33g enregistré au niveau du traitement ( $T_2$ ).

Les plantes irriguées par le traitement standard ( $T_4$ ) donnent un taux de matière sèche totale voisin de celui des traitements salins naturels (15.61g).

A ce propos, [132] note que les concentrations salines élevées provoquent une sécheresse physiologique précoce, ce qui rend de plus en plus difficile l'absorption d'eau et de nutriments par les plantes stressées, ce qui a pour conséquence un dessèchement précoce de la biomasse produite.

Par contre, les traitements salins corrigés ( $T_{1C}$ ,  $T_{2C}$ ) sont classés dans le groupe homogène intermédiaire entre les groupes dominants et les groupes qui manifestent le taux de matière sèche le plus faible.

Enfin, le taux de la matière sèche totale de la partie aérienne le plus faible est enregistré par le traitement ( $T_{3C}$ ) avec une valeur de 11.09g ce qui montre que l'ossature de ces plantes sont plus riche en eau et c'est ce qui donne une rigidité importante aux tissus aérienne.

#### 6.1.16. La matière sèche des feuilles [%]:

Le taux de la matière sèche des feuilles est représenté dans le tableau 38.

**Tableau N°38** : La matière sèche des feuilles [%]

<b>T1</b>	<b>T1C</b>	<b>T2</b>	<b>T2C</b>	<b>T3</b>	<b>T3C</b>	<b>T4</b>
17.63	12.25	16.04	12.19	12.07	9.61	14.32
±	±	±	±	±	±	±
3.83	0.79	0.29	0.54	1.11	1.09	0.05
a	ab	a	ab	ab	b	ab

L'analyse de la variance de la matière sèche des feuilles a révélé une différence significative entre les sept traitements testés ( $p < 0.02$ ). Les données obtenues sont donc assez précises, le test de Newman et keuls au seuil  $\alpha = 5\%$  fait ressortir trois groupements homogènes ou la dominante des traitements est celle du ( $T_1$  et  $T_2$ ) avec des valeurs correspondant a (17.63g et 16.04g) respectivement.

Compte tenu le stockage des sels dans les tissus foliaires de ces traitements dominants, les feuilles subissent une sécheresse physiologique précoce, ce qui rend de plus en plus difficile l'absorption d'eau et de nutriments par les plantes stressées.

A cet effet, les feuilles se dessèchent et leur poids se rapproche de poids sec donc la matière sèche devient très important.

Les traitements salins corrigés et le témoin ( $T_1C$ ,  $T_2C$  et  $T_4$ ) sont classés en deuxième groupe homogène (ab) ce qui montre que la correction des eaux salines naturelles améliore l'état hydrique de la plante et par conséquent le taux de la matière sèche de ces organes sera moindre que le précédent.

Il est également important de noter que la présence des ions sodium ( $Na^+$ ) liés aux chlorures ( $Cl^-$ ) et aux sulfates ( $SO_4^{2-}$ ) dans la solution saline qu'elle soit naturelle ( $T_3$ ) ou corrigée ( $T_3C$ ) révèlent les plus faibles taux de la matière sèche des feuilles.

#### 6.1.17. La matière sèche des tiges [%] :

Le taux de la matière sèche des tiges est présenté dans le tableau 39 :

**Tableau N°39:** La matière sèche des tiges [%]

<b>T1</b>	<b>T1C</b>	<b>T2</b>	<b>T2C</b>	<b>T3</b>	<b>T3C</b>	<b>T4</b>
14.43	17.95	16.52	17.99	14.13	16.10	19.36
±	±	±	±	±	±	±
1.87	0.81	1.01	1.13	1.41	0.91	0.44
b	ab	ab	ab	b	ab	a

Egalement l'analyse de la variance a révélé une différence significative ( $p < 0.01$ ) entre les différentes moyennes de la matière sèche des tiges mentionnées ci-dessus.

Le test de Newman et Keuls au seuil  $\alpha = 5\%$  fait ressortir trois groupes homogènes dont la valeur la plus élevée est celle issue des traitements arrosés par la solution standard à savoir ( $T_4$ ) avec un taux de matière sèche des tige égale à 19.36g.

Il y a lieu de noter que la présence des ions sodium ( $Na^+$ ) liés uniquement aux sulfates ( $SO_4^{2-}$ ) au niveau de traitement ( $T_1$ ), ou bien liés en partie aux chlorures ( $Cl^-$ ) et aux sulfates ( $SO_4^{2-}$ ) dans la solution saline naturelle ( $T_3$ ) révèlent les plus faibles taux de la matière sèche des tiges ce qui montre bien la nocivité des ions sodique sur les tissus aériennes de la plante inhibant l'absorption de l'eau du milieu nutritif.

D'après [133], l'apport de l'eau est nécessaire pour assurer un rendement maximum tant en produit frais qu'en produit sec. Autrement dit une plante a besoin de quantités importantes d'eau pour produire de la matière sèche.

Des résultats similaires ont été rapportés par [128] qui confirment que les deux principales manifestations de la salinité sont la réduction de la taille des plantes, et l'apparition de nécroses foliaires aux concentrations plus élevées, signes d'une toxicité par excès d'accumulation de sel dans les feuilles et les tiges.

## 6.2. Les paramètres physiologiques

### 6.2.1. Taux de proline dans les différents organes de la plante [ $\mu\text{g/g MF}$ ]:

La proline est un acide aminé synthétisé par la plante pour affronter un stress environnemental. Pour localiser cet osmo-régulateur, nous avons préconisé son dosage dans les différentes parties de la plante (racine, tige, feuille basale, médiane et apicale).

Le tableau suivant montre le taux du proline dans les différentes parties de la plante (souterraine et aériennes) (tableau 40)

**Tableau N°40** : Taux du proline dans les différentes organes de la plante [ $\mu\text{g/g MF}$ ]:

	<b>T1</b>	<b>T1C</b>	<b>T2</b>	<b>T2C</b>	<b>T3</b>	<b>T3C</b>	<b>T4</b>
Racines	0.11	0.42	0.15	0.26	0.18	0.18	0.06
	±	±	±	±	±	±	±
	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
	E	a	d	b	c	c	f
Tiges	0.15	0.46	0.44	0.56	0.18	0.47	0.19
	±	±	±	±	±	±	±
	0.01	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.02
	C	b	b	a	c	b	c
Feuilles basales	0.18	0.31	0.16	0.25	0.18	0.51	0.11
	±	±	±	±	±	±	±
	0.01	0.03	0.01	0.07	0.00	0.00	0.01
	Cd	b	cd	bc	cd	a	d
Feuilles médianes	0.32	0.74	0.18	0.97	0.42	0.69	0.13
	±	±	±	±	±	±	±
	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.04	0.00
	E	b	f	a	d	c	g
Feuilles apicales	0.52	0.86	0.49	0.73	0.37	0.90	0.20
	±	±	±	±	±	±	±
	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
	D	b	e	c	f	a	g

L'analyse de la variance montre qu'il y a une différence très hautement significative entre les différents traitements testés ce qui montre bien que leurs actions sur la production de proline synthétisée par les plantes et ce en fonction de l'intensité du stress salin, de la nature de la solution (naturelle ou corrigée) et surtout au niveau de l'organe végétal (racine, tiges et feuille) de la plante.

Les données du tableau 40 indiquent que, la proline augmente de teneur dans tous les organes de la plante en fonction de l'augmentation de la salinité. Aussi, on remarque que cet osmoprotecteur migre remarquablement vers les tissus foliaires de manière progressive.

Cet acide aminé s'accumule de préférence dans les feuilles apicales lorsque la concentration du milieu augmente. On note également que, les feuilles apicales de la tomate sont plus riches en proline que les autres organes, aussi bien dans les plantes alimentés par les solutions salines corrigées qui ont été révélés des quantités de proline les plus élevées que celle issue de la solution nutritive standard (T<sub>4</sub>). Cette augmentation varie au niveau des traitements salins corrigés d'environ 5 fois pour le (T<sub>3</sub>C), (T<sub>1</sub>C) et uniquement 4 fois pour le (T<sub>2</sub>C).

Il a été précédemment constaté que les plantes irriguées par des eaux salines corrigées (T<sub>1</sub>C, T<sub>2</sub>C et T<sub>3</sub>C) poussent mieux que les plantes arrosées par les mêmes traitements mais sans correction. Ces plantes issues des traitements salins corrigés produisent plus de proline. La correction de l'eau saline améliore l'absorption hydrominérale des plantes ce qui montre bien que le milieu nutritif n'est plus toxique pour la plante. Les plantes n'ont pas ou peu de carences minérales, ni déshydratation de la biomasse produite. Cependant ces traitements corrigés (T<sub>1</sub>C, T<sub>2</sub>C et T<sub>3</sub>C) présentent une concentration en osmolytes plus forte dans les traitements salins naturels (T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> et T<sub>3</sub>). L'osmolarité externe est donc plus forte, ce qui nécessite un ajustement de l'osmolarité interne encore plus fort (pour ne pas se déshydrater car l'eau va du milieu de moins concentré vers le milieu le plus concentré) ce qui se traduit par une production accrue de proline.

En revanche, les plantes alimentées par les traitements salins bruts (T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, et T<sub>3</sub>) accumulent moins de proline dans toutes les parties végétales testées. Ceci est dû au fait que les milieux sont chargés de sels déséquilibre donc créés un potentiel osmotique externe plus fort.

Le stress osmotique perçu par les plantes des traitements (T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> et T<sub>3</sub>) induit une réponse de défense qui est une production de proline pour ajuster l'osmolarité

interne mais qui reste inférieure à celle produite par les plantes alimentées par les eaux salines corrigées.

Nous constatons également que, l'accumulation du composé azoté dans les racines est environ deux à trois fois moins élevée que dans les feuilles apicales. Comparativement, le traitement (T<sub>1</sub>C) accumule une quantité de proline la plus élevée au niveau des racines et cette plantes irriguées par le témoin (T<sub>4</sub>) (0,42 et 0,06 µg/g MF respectivement).

Par contre au niveau des tiges, la teneur en proline la plus élevée est enregistrée chez les plantes alimentées par le traitement où le sodium est lié partiellement avec les sulfates et les chlorures. On signale par ailleurs, que la proline évolue régulièrement des racines vers les feuilles, aussi bien chez les plantes témoins que celles traitées par les solutions salines naturels ou corrigés.

### 6.2.2. Taux de la chlorophylle (A) [µg/g MF]:

Les résultats obtenus sont classés dans le tableau 41.

**Tableau N°41:** Taux de la chlorophylle (A) [µg/g MF]

T1	T1C	T2	T2C	T3	T3C	T4
0.16	0.46	0.22	0.41	0.13	0.29	0.50
±	±	±	±	±	±	±
0.01	0.00	0.01	0.09	0.01	0.01	0.11
c	A	c	ab	c	bc	a

L'analyse de la variance montrée qu'il existe une différence hautement significative du facteur traitement sur le taux de la chlorophylle (A) dans les feuilles médianes des plantes de tomate. Le test de Newman et keuls au seuil  $\alpha = 5\%$  fait ressortir quatre groupes homogènes. Cependant, les plantes traitées par la solution nutritive standard (T<sub>4</sub>) et la solution saline corrigée (T<sub>1</sub>C) synthétisent la plus grande quantité de fluorescence chlorophyllienne (A) avec des valeurs de 0.50 et 0.46 µg/g MF respectivement ; suivi par les autres traitements salins corrigés (T<sub>2</sub>C et T<sub>3</sub>C) qui manifestent des valeurs qui correspondent à 0.41 et 0.29 µg/g MF respectivement.

Ces résultats obtenus sont justifiés par une meilleure alimentation hydrominérale suite à la correction des eaux salines naturelles qui se traduit par une grande biomasse foliaire produite.

Les traitements salins naturels ( $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$ ) sont classés au groupe (c) avec des valeurs qui correspondent 0.22, 0.16 et 0.13  $\mu\text{g/g}$  MF respectivement, se traduisant aussi par des diminutions de 56%, 68% et 74% par rapport au traitement standard ( $T_4$ ).

Des résultats similaires ont été trouvées par les travaux de [131] qui notent que l'acte photochimique des photosystèmes II (différents processus de captation de la lumière et transfert des électrons en provenance de la photolyse de l'eau) des plants traités par les eaux salines présentent des perturbations qui pourraient être attribuées aux fortes concentrations des assimilât dans les feuilles.

### 6.2.3. Taux de la chlorophylle (B) [ $\mu\text{g/g}$ MF]:

Les résultats obtenus de dosage de la chlorophylle (B) sont classés dans le tableau 42.

**Tableau N°42:** Taux de la chlorophylle (B) [ $\mu\text{g/g}$  MF]

<b>T1</b>	<b>T1C</b>	<b>T2</b>	<b>T2C</b>	<b>T3</b>	<b>T3C</b>	<b>T4</b>
0.11	0.23	0.04	0.33	0.09	0.32	0.26
$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$
0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.11
c	a	c	ab	c	bc	a

L'analyse de la variance montre qu'il y a une différence hautement significative entre les différentes moyennes mesurées du Taux de la chlorophylle (B) dans les feuilles médianes de la tomate. Le test de Newman et keuls au seuil  $\alpha = 5\%$  fait ressortir quatre groupes homogènes.

Les résultats, présentés dans le tableau ci-dessus montrent que les plantes traités par les solutions salines corrigées  $T_2C$  et  $T_3C$  synthétisent le taux du chlorophylle (B) la plus importante avec des valeurs qui correspondent a 0.33 et 0.32  $\mu\text{g/g}$  MF respectivement. Ceci peut être expliqué par l'équilibre ionique parfait de ces milieux nutritifs.

En revanche, les trois traitements salins naturels ( $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$ ) révèlent les moyennes les plus faibles en chlorophylle (B). Ceci peut être expliqué par l'oxydation des pigments chlorophylliens en raison du taux et de déséquilibre ionique des milieux nutritifs.

Des résultats similaires ont été trouvés par les travaux de [3] où ils montrent que dans un milieu salin, le taux de chlorophylle (B) est affecté en raison des perturbations coursées au niveau des chloroplastes.

#### 6.2.4. Taux de la chlorophylle (C) (Caroténoïdes) [ $\mu\text{g/g}$ MF]:

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 43.

**Tableau N°43:** Taux de la chlorophylle (C) [ $\mu\text{g/g}$  MF]

T1	T1C	T2	T2C	T3	T3C	T4
7.44	11.30	7.53	17.00	4.50	14.93	17.14
$\pm$						
0.04	0.01	0.02	0.18	0.06	0.86	0.01
d	C	d	a	e	b	a

La quantité des caroténoïdes accumulés dans les feuilles de la tomate d'après l'analyse de la variance a révélé une différence très hautement significative entre les moyennes trouvées. Les résultats sont classés statistiquement d'après le test de Newman et keuls au seuil  $\alpha = 5\%$  en cinq groupes homogènes où la dominance en chlorophylle (C) est obtenue par les plantes alimentées au niveau des solutions salines corrigées ( $T_2C$  et  $T_3C$ ) ainsi qu'au niveau du témoin ( $T_4$ ).

Les meilleurs résultats révélés sont ceux où les plantes sont alimentées par le traitement nutritif standard ( $T_4$ ) et les eaux salines corrigées où les ions de sodium et le magnésium sont en liaison avec des chlorures et les sulfates ( $T_2C$  et  $T_3C$ ) respectivement ; est argumentée par la richesse des milieux en éléments nutritives.

Les plantes alimentées par les eaux salines naturelles ( $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$ ) manifestent un taux de caroténoïdes la plus faible et notamment au niveau des plantes alimentées par le traitement ( $T_3$ ) avec une valeur de  $4.50 \mu\text{g/g}$  MF.

Ceci peut être expliqué par la salinité des eaux et le déséquilibre ionique qui exercent une répression sur les chloroplastes en perturbant ainsi le bon déroulement de l'acte photochimique des photosystèmes II. Les travaux de [135] ont montré que l'accumulation des sels affecte la régulation du transport des électrons au niveau des chloroplastes dans la feuille de tomate.

#### 6.2.4. Taux de sucre totaux dans les feuilles [ $\mu\text{g/g MF}$ ]:

Les moyennes de ce paramètre sont présentées dans le tableau 44

**Tableau N°44:** Taux de sucre totaux des les feuilles [ $\mu\text{g/g MF}$ ]

<b>T1</b>	<b>T1C</b>	<b>T2</b>	<b>T2C</b>	<b>T3</b>	<b>T3C</b>	<b>T4</b>
1.03	1.15	1.32	1.39	1.92	2.47	1.06
±	±	±	±	±	±	±
0.00	0.00	0.04	0.01	0.01	0.00	0.01
f	e	d	c	b	a	F

L'analyse de la variance montre qu'il y a une différence très hautement significative entre les différents traitements testés ce qui montre clairement leur action sur la production de sucres solubles des leurs feuilles. Le test de Newman et keuls au seuil  $\alpha = 5\%$  fait ressortir six groupements homogènes.

Les moyennes classées dans le tableau 44 montrent qu'il existe une corrélation positive entre l'augmentation de la salinité des eaux d'irrigation et la production de sucre dans les feuilles de tomate. La correction des eaux salines améliore l'absorption hydrominérale. Cependant, l'osmolarité externe est donc plus forte, ce qui nécessite un ajustement de l'osmolarité interne encore plus fort (pour ne pas déshydrater les plantes car le passage de l'eau ce fait du milieu le moins concentré vers le plus concentré) ce qui se traduit par une production accrue de sucre totaux.

Pour les plantes irriguées par le traitement nutritif standard ( $T_4$ ), l'accumulation des sucres totaux des les tissus foliaires est plus faible. Ceci est probablement expliqué par une forte activité photosynthétique qui nécessite une grande quantité d'énergie ce forme d'ATP.

Les travaux de [4] joindre les résultats trouvés où ils ont rapportés que le contenu foliaire en sucres solubles est significatif lorsque la salinité des eaux d'irrigation devient très importante.



**Figure N°17:** Aspect général des fruits de tomates récoltés à partir des plants irrigués par des différents traitements

### 6.3. Paramètres physicochimiques :

#### 6.3.1. Taux des sures dans les fruits [%] :

Les résultats de ce paramètre sont mentionnés dans le tableau 44.

**Tableau N°44:** Taux de sucre dans les fruits [%]

<b>T1</b>	<b>T1C</b>	<b>T2</b>	<b>T2C</b>	<b>T3</b>	<b>T3C</b>	<b>T4</b>
4.07	7.39	4.10	7.28	3.20	7.70	4.90
±	±	±	±	±	±	±
0.00	0.16	0.14	0.02	0.00	0.33	0.23
c	a	c	a	d	a	b

L'analyse de la variance montre qu'il y a une différence hautement significative de l'effet de milieu sur le taux du sucre dans les fruits. Le test de Newman et keuls au seuil  $\alpha = 5\%$  fait ressortir quatre groupes homogènes.

Les fruits récoltés à partir des plantes traitées par des eaux salines corrigées (T<sub>3</sub>C, T<sub>1</sub>C et T<sub>2</sub>C) ont permis d'améliorer la teneur en sucres totaux des fruits avec des valeurs qui correspondent à (7.70%, 7.39 %et 7.28%) respectivement, suivi par les plantes alimentées par le traitement nutritif standard (T<sub>4</sub>) avec un taux de 4.90%. Cette amélioration de la teneur en sucres totaux des fruits est due selon [132], à une baisse d'utilisation des sucres pour la croissance, et donc dépend de l'aptitude de la plante à croître en conditions de salinité lorsque le milieu salin est corrigé et ayant un rapport ionique équilibré.

Concernant le taux de sucre dans les fruits de tomate traités par des eaux salines naturelles, il est à noter que la salinité manifeste un effet négatif sur ce taux. De ce fait les plantes traitées par (T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> et T<sub>3</sub>) produisent des fruits les moins sucrés étant donné que ces molécules sont utilisées pour la survie des plantes.

Dans ce contexte, [132] montre que l'excès de sel peut provoquer des problèmes de membranes, des inhibitions enzymatiques ou un dysfonctionnement métabolique général, d'où une photosynthèse réduite induisant une réduction de la synthèse glucidique.

### 6.3.2. Taux de vitamines « C » dans les fruits [%] :

Les fruits de tomate sont en général riches en acide ascorbique. De ce fait, nous avons préconisées un dosage de la vitamine « c » dans les fruits récoltés à partir des plants traités par différents traitements.

Les résultats sont présentés dans le tableau 45.

**Tableau N°45:** Taux de vitamines « C » dans les fruits [%]

T1	T1C	T2	T2C	T3	T3C	T4
15.99	39.01	9.17	23.24	8.74	26.65	21.10
±	±	±	±	±	±	±
0.00	0.60	0.00	0.11	0.00	1.81	1.80
d	a	e	c	e	b	c

L'analyse de la variance montre qu'il y a une différence hautement significative entre les différentes moyennes mesurées de la quantité de la vitamine « C » dans les fruits de tomate. Le test de Newman et keuls au seuil  $\alpha = 5\%$  fait ressortir cinq groupes homogènes.

Les fruits récolté à partir des plants qui sont arrosées par le traitement salin corrigé (T<sub>1</sub>C) sont les plus riches en acide ascorbique avec une valeur de 39.01%, alors que ce même traitement lorsqu'il est naturel, donne un taux de vitamine « c » classé en quatrième groupe homogène (D) avec une valeur de 15.99% ce qui correspond à une diminution de 59.01%.

La correction de la solution saline naturelle (T<sub>3</sub>) ou les ions de sodium (Na<sup>+</sup>) sont liés en partie avec les chlorures (Cl<sup>-</sup>) et les sulfates (SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>) donne un taux de vitamine « C » 26.65%. L'irrigation avec le traitement (T<sub>3</sub>) présente des fruits qui ayant une teneur la moins riche en acide ascorbique (8.74%).

Les résultats obtenus peuvent être justifiées par un déclenchement de l'activité enzymatique qui dégrade l'amidon en sucre et en vitamine en quantité très importante surtout chez les plantes qui ont reçus des solutions salines corrigées suite à une meilleure alimentation hydrominérale et a l'équilibres ioniques parfait du milieu alimentaires.

### 6.3.3. Taux d'acidité titrable dans les fruits:

Les valeurs moyennes de l'acidité des fruits sont présentées dans le tableau 46.

**Tableau N°46:** Taux d'acidité titrable dans les fruits [g d'acide citrique/100g de jus]

T1	T1C	T2	T2C	T3	T3C	T4
0.29	1.16	0.24	0.65	0.67	1.21	0.40
±	±	±	±	±	±	±
0.00	0.04	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00
e	b	f	c	c	a	d

L'analyse de la variance révèle une différence très hautement significative du facteur solution sur le paramètre mesuré. A cet effet, le test de Newman et keuls au seuil  $\alpha = 5\%$  fait ressortir six groupes homogènes.

Les fruits récoltés à partir des plantes alimentées par la solution saline corrigée (T<sub>3</sub>C) présentent l'acidité la plus élevée avec une valeur de 1.21g d'acide citrique/100g de jus. Suivi par les plantes irriguées par les traitements salines corrigées (T<sub>1</sub>C et T<sub>2</sub>C). Enfin, le traitement salin naturel (T<sub>3</sub>).

Des résultats similaires sont observés par [137] où ils ont montré qu'une salinité associée à une meilleure alimentation des plantes, notamment en potassium, améliore l'accumulation des acides organiques tout en diminuant la teneur en eau des cellules. A cet effet, la plante peut maintenir la turgescence des cellules et répondre ainsi au stress salin modéré.

Un effet contradictoire est observé avec les traitements naturels (T<sub>1</sub> et T<sub>2</sub>) où l'on constate des teneurs en acidité les plus faibles (0.29 et 0.24 g d'acide citrique/100g de jus). Ce qui représente un écart par rapport aux fruits issus des traitements salins corrigés (T<sub>3</sub>C) de quatre et cinq fois respectivement.

## 6.4. Les paramètres de rendements

### 6.4.1. Nombre de fleurs par bouquet floral :

Les valeurs moyennes du nombre de fleurs par bouquet sont présentées dans le tableau 47.

**Tableau N°47** : Nombre de fleurs par bouquet floral :

	<b>T1</b>	<b>T1C</b>	<b>T2</b>	<b>T2C</b>	<b>T3</b>	<b>T3C</b>	<b>T4</b>
1 <sup>er</sup> Bouquet floral	3.75	8.15	4.55	8.25	3.95	7.25	6.90
	±	±	±	±	±	±	±
	0.07 b	0.78 a	0.07 b	0.07 a	0.07 b	0.78 a	0.14 a
2 <sup>ème</sup> Bouquet floral	3.70	7.95	4.10	7.05	4.00	7.75	7.55
	±	±	±	±	±	±	±
	0.28 b	1.77 a	0.71 b	0.64 a	0.99 b	0.64 a	0.35 a

L'analyse de la variance montre qu'il existe une différence très hautement significative entre les différentes moyennes du paramètre étudié. Le test de Newman et keuls au seuil  $\alpha = 5\%$  révèle deux groupes homogènes dans le premier bouquet floral est dominé par les traitements salins corrigés et le témoin (T1C, T2C, T<sub>3</sub>C et T4). Les plantes irriguées par le traitement (T<sub>2</sub>C et T<sub>1</sub>C) manifestent le nombre des fleurs le plus élevé au niveau des deux bouquets floraux avec des valeurs de 8.25 et 7.95 respectivement.

A l'inverse, les traitements salins naturels (T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> et T<sub>3</sub>) au niveau des deux bouquets floraux sont classés dans le groupe (b) avec une régression de (53.98%, 44.84% et 45.51%) respectivement dans le premier bouquet, et de (53.45%, 41.84% et 48.38%) dans le deuxième bouquet et ce par rapport aux mêmes traitements corrigés. On peut noter également que la floraison est plus affectée lorsque l'élément magnésium apporté est lié aux chlorures et l'élément sodium est lié aux sulfates pour former la solution d'irrigation (T<sub>1</sub>).

Des résultats similaires ont été notés par [1] où ils ont montrés que le nombre des fleurs diminuent avec l'augmentation de la salinité du milieu quelque soit le type de sels testé.

#### 6.4.2. Nombre des fruits par bouquet :

Les valeurs moyennes du nombre de fruits par bouquet sont présentées dans le tableau 48.

**Tableau N°48** : Nombre des fruits par bouquet :

	<b>T1</b>	<b>T1C</b>	<b>T2</b>	<b>T2C</b>	<b>T3</b>	<b>T3C</b>	<b>T4</b>
1 <sup>er</sup> Bouquet floral	3.65	8.00	4.10	7.90	3.65	7.00	6.55
	±	±	±	±	±	±	±
	0.21 b	0.42 a	0.99 b	0.85 a	0.65 b	0.42 a	0.07 a
2 <sup>ème</sup> Bouquet floral	1.45	7.50	2.05	6.90	1.50	7.30	7.25
	±	±	±	±	±	±	±
	0.78 b	0.57 a	1.20 b	0.53 a	0.57 b	0.00 a	0.01 a

L'analyse de la variance montre qu'il y a une différence hautement significative du facteur traitement sur le paramètre mesuré au niveau des deux bouquets. Le test de Newman et keuls au seuil  $\alpha = 5\%$  fait ressortir deux groupes homogènes.

Les eaux salines corrigées et le témoin (T<sub>1</sub>C, T<sub>2</sub>C, T<sub>3</sub>C et T<sub>4</sub>) manifestent le nombre des fruits le plus important quelque le bouquet floral. Ceci est probablement expliqué par l'équilibre parfait des milieux nutritifs et sa richesse en éléments minéraux indispensable pour la fructification des plantes.

En revanches, les plantes alimentées par les solutions salines naturelles (T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> et T<sub>3</sub>) présentent le nombre des fruits le plus faible dans les deux bouquets. Ces résultats probablement due à l'effet de la salinité qui inhibe la fructification et qui augmente le taux d'avortement des fleurs suite a la mauvaise alimentation hydrominérale des plantes et au déséquilibre ionique des milieux nutritifs.

### 6.4.3. Calibre des fruits

La répartition des calibres en % du poids total des fruits récoltés est présentée dans le tableau 49.

**Tableau 49:** Répartition des calibres en % du poids total des fruits récoltés

	T <sub>1</sub>	T <sub>1</sub> C	T <sub>2</sub>	T <sub>2</sub> C	T <sub>3</sub>	T <sub>3</sub> C	T <sub>4</sub>
<b>Ø&lt;47 mm</b>	28.22	40.69	44.07	35.48	100	61.58	25.89
<b>47mm&lt;Ø&lt;57mm</b>	71.78	40.29	55.93	58.84	–	38.42	56.17
<b>57mm&lt;Ø&lt;67mm</b>	–	19.02	–	3.88	–	–	16.30
<b>67mm&lt;Ø&lt;77mm</b>	–	–	–	1.80	–	–	1.64
<b>Ø&gt;77mm</b>	–	–	–	–	–	–	–
<b>Σ</b>	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

D'après le tableau 49, on peut remarquer que la salinité des eaux d'irrigation affecte négativement le calibre des fruits de tomate. On remarque que la présence des deux sels nocifs (NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) dans la solution saline naturelle (T<sub>3</sub>) a permis d'obtenir la totalité des fruits ayant un calibre inférieur à (D< 47 mm).

En revanche, la solution saline corrigée et le témoin (T<sub>1</sub>C et T<sub>4</sub>) ont permis de produire des fruits ayant un calibre compris entre 57 et 67 mm. Ainsi, on peut noter une légère augmentation du calibre des fruits chez les plantes irriguées par la solution (T<sub>1</sub>C) lorsque le magnésium apporté est lié aux chlorures et le sodium est lié aux sulfates.

Des observations similaires ont été notées par [136] et [137] où ils rapportèrent que la taille des fruits diminue avec la salinité car l'accumulation de matière sèche dans les fruits est réduite.

#### 6.4.4. Estimation de la fructification [kg]:

L'estimation de la production par plante est présentée dans le tableau 50.

**Tableau N°50** : Poids total des fruits [kg] :

T1	T1C	T2	T2C	T3	T3C	T4
1.63	6.81	1.22	6.67	1.82	4.72	8.81
±	±	±	±	±	±	±
0.42	0.65	0.13	0.89	0.05	0.12	1.25
d	b	d	b	d	c	a

L'analyse de la variance montre qu'il y a une différence très hautement significative entre les moyennes estimées du paramètre étudié. Ces résultats montrent que l'effet de la salinité varie de façon très remarquable entre les différents traitements. Le test de Newman et keuls au seuil  $\alpha = 5\%$  indique la présence quatre groupes homogènes.

Les plantes irriguées par la solution nutritive standard ( $T_4$ ) manifeste le poids des fruits le plus important avec une valeur de 8.81 kg, suivi par les plantes alimentées par les solutions salines corrigées ( $T_{1C}$ ,  $T_{2C}$ ) avec un rendement global égal (6.81 et 6.67 kg).

Nos résultats sont concordent avec ceux de [137] où ils montrèrent que le poids de fruit n'est pas lié au développement végétatif, mais dépend surtout du niveau de l'alimentation hydrominérale où d'ailleurs nous avons enregistré les meilleurs taux d'absorption hydrominéral (tableau 52).

À l'inverse, les traitements salins naturels ( $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$ ) manifestent les valeurs les plus faibles avec une diminution du poids des fruits varié de l'ordre de cinq fois pour ( $T_1$  et  $T_3$ ) et sept fois pour le ( $T_2$ ). Ceci probablement dû d'une part, au retard de la fructification exerce par le déséquilibre ionique de ces milieux nutritifs, et d'autre part, par le taux d'avortement le élevé enregistrés au niveau de ces plantes.

#### 6.4.5. Taux d'avortement [%] :

Les résultats relatifs aux taux de fleurs avortées par traitement sont présentés dans le tableau ci-dessus

**Tableau N°51** : Taux d'avortement [%] :

	<b>T1</b>	<b>T1C</b>	<b>T2</b>	<b>T2C</b>	<b>T3</b>	<b>T3C</b>	<b>T4</b>
1ère Bouquet floral	2.67	1.84	9.89	4.24	7.59	3.45	5.07
2ème Bouquet floral	61.84	5.66	50.00	2.13	62.50	5.81	3.97

D'après le tableau 51, on peut observer que La variété de tomate Saint-Pierre s'est montrée plus sensible aux traitements salins naturels (T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> et T<sub>3</sub>) et ce au niveau des deux bouquets floraux. Par contre, la correction des eaux salines naturelles et la solution nutritive standard (T1C, T2C, T<sub>3</sub>C et T4) a permis de diminuer le taux d'avortement des fleurs et ce compte tenue l'équilibre ionique parfait des milieux alimentaires.

On peut aussi noter également que le taux d'avortement des fleurs est encore plus important au niveau du bouquet 2 et toujours pour les plantes alimentées par les solutions salines naturelles .Ces résultats pouvant être expliqués par le déséquilibre des osmolites dans les milieux causant une mauvaise alimentation hydrominérale suite à une osmolarité élevée des milieux testés.

En revanche, les traitements salins corrigés et le témoin présentent au niveau du bouquet 2 un taux d'avortement le plus faible suite aux conditions favorables de nutrition des plantes de tomate.

#### 6.5. Taux d'absorption hydrominéral des plantes [%]:

Les résultats relatifs au taux d'absorption hydrominéral sont présentés dans le tableau 52.

**Tableau N°52** : taux d'absorption hydrominérale (%):

<b>T1</b>	<b>T1C</b>	<b>T2</b>	<b>T2C</b>	<b>T3</b>	<b>T3C</b>	<b>T4</b>
28.06	61.73	31.60	62.66	31.19	46.66	81.86
±	±	±	±	±	±	±
2.92	9.62	0.93	0.75	0.90	0.67	0.67
c	ab	c	ab	c	ab	a

L'analyse de la variance a révélé une différence significative entre les moyennes du paramètre mesuré. En effet le test de Newman et Keuls au seuil  $\alpha = 5\%$  fait ressortir trois groupes homogènes qui sont dominés par le traitement standard ( $T_4$ ) avec une valeur de 81.86 ml, suivi par les trois traitements salins corrigés ( $T_1C$ ,  $T_2C$  et  $T_3C$ ) qui sont classés au deuxième groupe homogène (ab) avec les taux respectifs de 61.73, 62.66 et 46.66 %.

Ces taux élevés sont expliqués par les besoins nutritifs importants des plants exigés par leur stade de développement et notamment par l'équilibre parfait des milieux nutritifs où les plantes trouvent dans les milieux alimentaires les éléments nutritifs indispensables.

En ce qui concerne les solutions salines naturels, leurs taux sont classés en derniers groupe homogène (c) avec les valeurs les plus basses en raison du déséquilibre ionique et de l'absence des éléments utiles tels que l'azote, le potassium et le phosphore.

## 6.6. Discussion générale :

L'expérimentation a été réalisée dans le but de déterminer le ou les sels les plus nocifs et les plus agressifs sur la croissance et le développement de la tomate (variété Saint-Pierre) cultivée en hors-sol et irriguée par trois eaux salines naturelles puis corrigées et un témoin (solution nutritive standard), il s'agit de ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{MgCl}_2$ ).

La réaction des plantes à la salinité se fait par des modifications adaptatives morphologiques, anatomiques, structurales et métaboliques. Pour détecter la tolérance des plantes à la salinité, il est intéressant de disposer de moyens précis et simples.

Chez toutes les espèces végétales, glycophytes comme halophytes, la salinité du milieu entraîne, à partir d'un certain seuil, une réduction de la biomasse. Néanmoins, le degré d'inhibition de la croissance dépend du genre, de l'espèce, de la variété, ainsi que du stade de développement de la plante et de la nature de l'organe.

L'irrigation avec les eaux salines conduit à l'augmentation de la salinité dans le milieu racinaire. Le déséquilibre ionique des traitements salins naturels testés ( $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$ ) accentue l'effet de la salinité des milieux alimentaires, ce qui limite la croissance des plantes de tomate, et réduit en conséquence, la consommation hydrique et minérale qui est en relation avec l'évapotranspiration. Par contre, la concentration élevée de sels dans les milieux nutritifs corrigés et dont l'équilibre ionique est parfait favorise le développement végétatif des plantes de tomate.

L'application des traitements salins naturels ( $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$ ) aux plantes expérimentées ont eut le même effet, à savoir le retard de la vitesse de croissance (environ 20 jours), la limitation de la croissance et le développement qui a été mis en évidence à travers les différents paramètres mesurés (hauteur finale des plants, diamètre des tiges, nombre de feuilles, biomasse fraîche et sèche de la partie aérienne, biomasse fraîche et sèche des racines, nombre et poids des fruits), et un retard de floraison et de nouaison.

En revanche, la correction de ces solutions salines, à savoir ( $T_1C$ ,  $T_2C$  et  $T_3C$ ) a permis aux plantes de croître et de se développer à un rythme similaire à celui des plantes alimentées par la solution nutritive équilibrée non saline à savoir le témoin  $T_4$  et de ce fait réaliser correctement son cycle de développement et d'échapper à l'effet néfaste de la salinité.

A l'inverse, les traitements salins naturels ( $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$ ) manifestent une augmentation significative de la matière sèche totale (feuilles + tiges) et la matière sèche des feuilles par rapport au témoin ( $T_4$ ) et aux autres traitements salins corrigés à savoir ( $T_1C$ ,  $T_2C$  et  $T_3C$ ) et ce compte tenu le dessèchement précoce des plantes du à la mauvaise croissance des plantes et à l'inhibition de la photosynthèse au niveau des chloroplastes en particulier par l'accumulation du sodium et des chlorures au niveau des jeunes feuilles qui limitent le mouvement des stomates et de la photosynthèse.

En ce qui concerne l'effet de la salinité des eaux d'irrigation sur les paramètres éco physiologique. La réponse biochimique, analysée à travers l'expression de l'accumulation de la proline montre que les plantes de tomate accumulent ce composé protéinique dans les différents organes (racines, tiges et feuilles) dans des proportions variables. Cette accumulation varie d'un organe à un autre, d'une espèce à l'autre, selon la nature et l'intensité du stress.

Chez la variété de tomate Saint-Pierre, l'accumulation de la proline se fait dans le sens racines, tiges feuilles basales, feuilles médianes et feuilles apicales aussi bien chez les plantes témoins que celles irrigués par des eaux salines naturelles et corrigées avec une accumulation plus importante chez les traitements salins corrigés que ceux naturelles. On peut également noter que les milieux salins corrigés ne sont pas toxique pour les plantes. Un plante ne manifeste pas de carence minérale, ni de déshydrations et donc poussent convenablement. Cependant ces eaux corrigées présentent une concentration en osmolytes plus forte que dans les eaux salines naturelles. L'osmolarité interne est donc plus forte, ce qui nécessite pour les plantes un ajustement de l'osmolarité interne encore plus fort pour ne pas se déshydraté car l'eau va de milieu le moins concentrée vers le plus concentrée ce qui traduit par une production accrue de proline dans les traitements salin corrigées. Les plantes alimentées par le traitement nutritif standard ( $T_4$ ) présentent le taux de proline le moins élevée suite à l'absence de stress osmotique.

Dans les tissus foliaires, l'acide aminé étudié se concentre préférentiellement dans les feuilles apicales à des teneurs significativement élevées sont observées au

niveau des traitements salins corrigés. Au niveau des tiges et des racines, la proline augmente d'une manière lente en fonction de la concentration des différents traitements salins.

En outre, le transport de cet acide aminé de la source (lieu de synthèse) au site de résistance apparaît comme un paramètre important dans l'acquisition de la résistance des plantes à la salinité. Généralement, le rôle attribué à la proline dans la réponse des plantes aux stress, reste parfois controversé: pour [138], son accumulation contribue à l'acquisition de cette résistance grâce à l'ajustement osmotique dont la proline est responsable.

L'évolution de la teneur en chlorophylle (A, B et C) montre que tous les traitements étudiés répondent parfaitement aux solutions d'irrigation préparés. Cependant, la réponse des traitements est variable, elle en fonction de type de sel présent et de l'intensité du stress.

Globalement, l'étude de la teneur en chlorophylle en conditions salines, fait ressortir que les traitements sont répartis en deux groupes. Un premier groupe relativement riche en chlorophylle, qui est constitué essentiellement de traitement nutritif standard ( $T_4$ ) et aux traitements salins corrigés à savoir ( $T_1C$ ,  $T_2C$  et  $T_3C$ ).

Un second groupe relativement pauvre en chlorophylle et essentiellement formé les Traitements ( $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$ ). En condition de stress salin, le pourcentage de réduction de la chlorophylle (A) et (B) varie de 68% ( $T_1$ ), 56% ( $T_2$ ) et 74% ( $T_3$ ), contre 57.69% ( $T_1$ ), 84.61% ( $T_2$ ) et 65.38% ( $T_3$ ) par rapport au traitement nutritif standard ( $T_4$ ) respectivement.

La diminution de la teneur foliaire en sucres solubles sous stress salin serait en partie due à l'effet inhibiteur des sels nocifs ( $Na_2SO_4$ , NaCl,  $MgSO_4$ ,  $MgCl_2$ ) sur la réaction de dégradation de l'amidon en sucres simples dans le cytosol, et aussi à une inhibition intra chloroplastique des enzymes impliquées dans la dégradation de l'amidon suite à un changement dans la composition ionique des chloroplastes.

L'analyse des principales composantes du rendement a montré que le déséquilibre ionique des traitements salins naturels réduit significativement le nombre et le poids moyen des fruits ainsi que leur calibre. Les mêmes résultats sont rapportés [136].

La production en fruits a augmenté au niveau des traitements salins corrigés par rapport aux traitements salins naturels, mais reste assez sensiblement faible par

rapport à celle du témoin. En effet, le nombre de fruits par plant a augmenté, mais pas en corrélation avec le calibre des fruits. Ainsi le poids des fruits est resté faible, en raison d'une concentration élevée en sels qui a stimulé la croissance végétative au détriment de la production en fruits, notamment lorsque le magnésium est lié aux sulfates.

On peut aussi noter une production plus élevée des fruits observée lorsque le magnésium apporté est lié aux chlorures, ceci s'explique par une meilleure adaptation des plantes de tomate aux conditions salines dans le cas où leur développement végétatif ne soit pas important.

La composition chimique des fruits est remarquablement modifiée par les différents traitements. Les teneurs en sucres totaux, en vitamine C et en acidité des fruits sont significativement augmentées au niveau des traitements salins corrigés ( $T_1C$ ,  $T_2C$  et  $T_3C$ ) par rapport au témoin ( $T_4$ ). A l'inverse, ces paramètres sont plus faibles dans des environnements salins naturels ( $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$ ).

Il a été observé que l'alimentation hydrominérale de la variété Saint-Pierre est plus importante dans les milieux salins corrigés. Par contre, le déséquilibre ionique au niveau des traitements salins naturels se manifestent par des carences minérales et des déshydratations précoce et donc les plantes ne poussent pas bien et ce fait la croissance est réduite et par la suite s'arrêt avec un raccourcissement impressionnant de cycle végétatif des plantes.

## CONCLUSION

Le présent travail a pour étude, le comportement de la variété de tomate Saint-Pierre cultivée en milieu salin. L'évaluation a porté sur l'aspect morphologique, éco physiologique et technologique face à l'effet toxique du sodium et du magnésium combinés aux sulfates et aux chlorures à fin de constituer les sels nocifs ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{MgCl}_2$ ). L'ensemble des résultats a permis d'aboutir aux conclusions suivantes:

✓ Les traitements salins corrigés sont un avantage pour la culture de tomate, car ils sont plus précoces que les traitements salins naturels. De plus, la production en fruits est préservée des effets néfastes de la salinité.

✓ La correction des eaux salines naturelles améliore significativement la plupart des paramètres de croissance. Des augmentations sont enregistrées concernant la hauteur et le diamètre des tiges, ainsi que le nombre des feuilles produites. La combinaison chlorures magnésium ralentie la croissance végétative des plantes comparée à la combinaison magnésiums-sulfates apportée et ce, en raison de l'augmentation de la pression osmotique et de l'effet inhibiteur des chlorures.

✓ L'équilibre nutritionnel dans les traitements salins corrigés a permis d'augmenter de manière significative le nombre de fruits par plante et à moindre mesure le poids moyen des fruits. Le rendement ainsi que le calibre des fruits sont restés faibles par rapport au témoin.

✓ La présence de stress salin notamment au niveau des traitements salins naturels et salins corrigés provoque une production de proline qui est une réponse induite de défense pour ajuster l'osmolarité interne pour éviter une déshydratation rapide des tissus végétaux suivi de la mort des plantes. Toutefois, la variation quantitative est fonction de l'espèce, de l'organe et de la nature du stress appliqué. Cette variation est probablement liée au rôle que joue cet acide aminé à l'échelle cellulaire ainsi que son implication dans l'ajustement osmotique. Il semblerait que les traitements irrigués par les deux types de solutions étudiées (salin naturel et salin corrigé) utilisent la même stratégie de tolérance vis à vis du stress salin avec un degré plus poussé au niveau des plantes alimentées par les eaux salines corrigées où l'on remarque que le système de défense est plus accentué car le taux de proline synthétisé est plus fort suite à la concentration en osmolytes plus forte des milieux alimentaires corrigées.

✓ les teneurs en chlorophylles (A, B et C) sont des paramètres très sensibles, qui peuvent nous renseigner sur le degré de tolérance de la culture de tomate à la salinité. Les traitements salins naturels ont montré des taux de réduction considérables de la chlorophylle. Par ailleurs, il faut signaler que la teneur en chlorophylle (A et B) est plus sensible à l'effet du stress salin que celle de la chlorophylle (C).

✓ L'exposition des plantes de tomate, cultivées en hydroponique et en milieu saumâtre est traduite par des modifications biochimiques et structurales se traduisant par une réduction de la teneur en sucres solubles.

Les plantes de tomates de la variété Saint-Pierre arrivent à croître et à se développer en ces conditions de salinité grâce principalement au mécanisme d'ajustement osmotique. Elles adoptent aussi la même stratégie face à la contrainte saline en tolérant une accumulation plus élevée d'ions  $Mg^{+2}$ ,  $Na^{+}$ ,  $SO_4^{-2}$  et  $Cl^{-}$  principalement dans leurs tissus foliaires. La teneur en potassium, même assez faible, suffit à assurer les besoins de croissance. La forme de combinaison magnésium - sulfate participe à une meilleure résistance de la tomate aux conditions salines du fait que l'absorption hydrominérale est facilitée par rapport à celle de la combinaison chlorure-magnésium.

Enfin, ces résultats seront d'un apport important pour participer à une meilleure conduite de la tomate dans les zones semi-arides et arides où la qualité des eaux fournies pour l'irrigation est défavorable. Cependant, des études à long terme doivent être entreprises afin de justifier le motif environnemental pour l'utilisation de ces eaux salines sans le risque d'accentuer le phénomène de salinisation.

## REFERENCES

1. M. Denden, T. Bettaieb, Alef Salhi & M. Mathlouthi : Effet de la salinité sur la fluorescence chlorophyllienne, la teneur en proline et la production florale de trois espèces ornementales, 2005, *Tropicultura*, 220-225.
2. Djerroudi Z, Belkhodja M, Bissati S, Hadjadj S : Effet du Stress Salin sur l'accumulation de Proline Chez Deux espèces d'*Atriplex Halimus* L. et *Atriplex Canescens* (Pursh) Nutt. ; 2010 *European Journal of Scientific Research*, pp.249-260.
3. H. Cheikh M'hamed, R. Abdellaoui, K. Kadri, M. Ben naceur, S. Bel hadj : evaluation de la tolerance au stress salin de quelques accessions d'orge (*hordium vulgare* L.) cultivées en Tunisie: approche physiologique, *Sciences& Technologie C-* N°28 Décembre (2008), pp.30 -37.
4. L. Ben khaled, A.Morte Gómezb, M. Honrubiab, A.Oihabia : Effet du stress salin en milieu hydroponique sur le trèfle inoculé par le *Rhizobium*, *Agronomie* 23 (2003), pp. 553–560.
5. De Broglie et Guérault, 2005 : Tomates d'hier et d'aujourd'hui. Paris, Hodpeke. 143.
6. Gilbert, 2009 : Etude de la biosynthèse de l'ascorbate et des métabolismes associés chez la Tomate Thèse doctorat d'Etat de L'université Bordeaux 2.pp 236
7. Schumann, 1996; Degioanni, 1997: La tomate. Paris, Hatier. 96.
8. Degioanni, 1997; Mikanowski et Mikanowski, 1999 :
9. Chahed.F, 2007 : la tomate "Lycopersicon esculentum" sous serre. Technique et documentation, Lavoisier, paris 163p
10. Brommonschenkel, S.H., Frary, A., and Tanksley, S.D. (2000). The broad-spectrum tospovirus resistance gene Sw-5 of tomato is a homolog of the root-knot nematode resistance gene Mi. *Mol Plant Microbe Interact* 13, 1130-1138.
11. Barbara. V, 2005 : la culture de tomate. Pp 105
12. Tanksley, S.D., Ganai, M.W., Prince, J.P., de Vicente, M.C., Bonierbale, M.W., Broun, P., Fulton, T.M., Giovannoni, J.J., Grandillo, S., Martin, G.B., and et al. (1992). High density molecular linkage maps of the tomato and potato genomes. *Genetics* 132, 1141-1160.
13. Moustfaoui, R., "Effet d'un anti-stress « Le Fertiactyl » en agriculture sous conditions salines", Thèse Magister, USD Blida, (2007), 100p.

14. Atherton et Rudich, 1986 : Développement et Pratique de la Fertigation du tomate dans le Périmètre Irrigué du Tadla.Maroc.Pp 16.
15. Kozukue N, Han J, Lee K, Friedman M, (2004). "Dehydrotomatine and alpha-tomatine content in tomato fruits and vegetative plant tissues." *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 52(7): 2079-2083.
16. Friedman, M. (2002). Tomato glycoalkaloids: role in the plant and in the diet. *J Agric Food Chem* 50, 5751-5780.
17. Johnson K S, 2005; "Plant phenolics as radical scavengers in the context of insect (*Manduca sexta*) hemolymph and midgut fluid." *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 53: 10120-10126.
18. Khavari Njad R.A. & Mostafi Y., 1998, Effects of NaCl on photosynthetic pigments, saccharides and chloroplast ultra structure in leaves of tomato cultivars. *Photosynthetica*, 35, 1, 151-154
19. Khelil A, Menu T, Ricard B, (2007). "Adaptative response to salt involving carbohydrate metabolism in leaves of a salt-sensitive tomato cultivar." *Plant Physiology and Biochemistry* 45: 551-559.
20. Madsen E, 1974. "The effect of CO<sub>2</sub>-concentration on the occurrence of a number of acids from citric acid cycle in tomato leaves." *Physiologia Plantarum* 32(1): 10-13.
21. Rey, Y., et Costes, C., "La physiologie de la tomate", Etude bibliographique, Ed. INRA, Paris, (1965), 111p.
22. Blanc, D., "Les cultures hors-sol", INRA, Paris, (1987), 409p.
23. Caris-Veyrat, C., Amiot, M.J., Tyssandier, V., Grasselly, D., Buret, M., Mikolajczak, M.,Guilland, J.C., Bouteloup-Demange, C., and Borel, P. (2004). Influence of organic versus conventional agricultural practice on the antioxidant microconstituent content of tomatoes and derived purees; consequences on antioxidant plasma status in humans. *J Agric Food Chem* 52, 6503-6509.
24. De Broglie et Guérault, 2005 : tomate d'hier et d'aujourd'hui. Paris. 134.
25. Moco, S., Capanoglu, E., Tikunov, Y., Bino, R.J., Boyacioglu, D., Hall, R.D., Vervoort, J., and De Vos, R.C. (2007). Tissue specialization at the metabolite level is perceived during the development of tomato fruit. *J Exp Bot* 58, 4131-4146.
26. Snoussi, 2010, Etude de base sur la Tomate en Algérie. Pp 53

27. Desmas, 2005 : Contribution à l'étude de l'influence de la salinité sur le couple tomate –Verticillium : Conséquences physiologiques et impact sur la bioprotection des tomates contre la verticilliose. Thèse doctorat d'Etat. Pp231
28. Gilbert ; 2009 : Etude de la biosynthèse de l'ascorbate et des métabolismes associés chez la Tomate. Rôle de la L-galactono-1,4-lactone déshydrogénase et de la GDP-D-mannose-3',5'-épimérase. Thèse Doctorat.Pp 136.
29. Skiredj, A., Elattir, H., Elfadi, A., "La culture du concombre", Inst. Agr. Vét., HassanII, (2005), 1-2.
30. Shankara, J. van L. de Jeude, M. de Goffau, M. Hilmi, v. Barbara : La culture de la tomate production, transformation et commercialisation. Agrodoc, 2005. Pp 1-105.
31. Chaux, C., "Productions légumière", J.B. Ballière, Paris, (1972), 414p.
32. Chibane. A, 1999 : tomate sous serre, bulletin : transfert de technologie en agriculture, N°57, Ed : PNTTA, Rabat, 18-22pp .
33. Chaux, C. et Foury, C., "Productions légumières", Tome III, "Légumineuses potagères, Légumes fruits", Technique et Documentation – Lavoisier, Paris, (1994), 563p.
34. Skiredj, A., "Besoins des plantes en eau et en éléments nutritifs", Fertigation-s : guide pour améliorer la production des cultures, Rabat, (2006), 1-9.
35. Besri. M, 2010 : Principales maladies cryptogamiques de la Tomate et stratégies de lutte. Pp 1-4.
36. Ziegler, 2008 : L'hydroponie ou culture hydroponique » maladies des plantes, agriculture et écologie. Pp16.
37. Robin, P., "Horticulture sans sol : histoire et actualité", Cahiers d'économie et sociologie rurale, n° 46-47, (1998), 98-129.
38. Martinez, 2000 Martinez, S., et Morard, P.,"Recyclage des solutions nutritives en culture hors-sol", Forum Graines de Chercheurs, ENSAT, Toulouse, ( Mai, 2000).
39. Aït Houssa. A, Nougá El., Oualili H., Chtaibat Y., Chaddad A. 2005 : Fertigation de la tomate hors sol dans la région de Douiet (Maroc). Ecole Nationale d'Agriculture de Meknès Domaine Agricole de Douie. Pp 1.15.

40. Reist A., Gysi Ch., 1990. Cultures hors sol: bilan écologique. Revue suisse Vitic., Arboric., Hortic. 22 (4), 223-235.
41. Morard, "Les cultures végétales en hors sol", Pub. Agris, Paris, (1995), 301p.
42. Benoit.F, Ceustermans. N, 1995 — Ecological aspects of horticultural soilless growing methods, Acta Horticulturae, 396, pp. 11- 24.
43. Hosni, 2009 ; La tolérance au sel, Ecophysiologie Végétale. Pp 1-6.
44. M. Lahlou, M. Badraoui, B. Soudi, A. Goumari, D. Tessier, Modélisation de l'impact de l'irrigation sur le devenir salin et sodique des sols, 2002. Pp 1-19
45. Iprid. 2006: conférence électronique sur la salinisation. Extension de la salinisation et stratégie de prévention et réhabilitation. P2, 11.
46. Legros.J-P, 2009 : La salinisation des terres dans le monde. Académie des Sciences et Lettres de Montpellier. Conférence n°4069, Bull. n°40, pp. 257-269
47. Bouzoudja. A, 1995: Effet de l'irrigation avec des eaux chargées en sels sodique sur la culture de tomate sous serre. Thèse. Ingénieur d'Etat. USD. Pp 12-28.
48. Badraoui M. Et Merzouk A., 1994 - Changes of soil qualities under irrigation the effect of sali accumulation on water retention by vertisols. in CIHEAM-IAM-B ed, Advanced course on farm water management techniques. Rabat, Morocco, May 7-22 1994, p. 145-155.
49. Zella, 2004 et Mouhouche. B, 2004 : Guide pratique de micro irrigation. Edition office des publications universitaires. Alger. 1-9 pp.
50. Servant J. " Contribution à l'étude pédologie des terrains halomorphes, l'exemple des sols salés du sud et du sud-ouest de la France", Montpellier, (1975), 195 p.
51. Mermoud, A., Musy, A., "Salinisation du sol depuis une nappe peu profonde : Stimulation de l'effet d'un abaissement de la nappe sur les remontées d'eau vers la surface", 42th. Int. Executive concil Meeting of ICID, China, (2006), 14. 1-9.
52. Daoud, R., Halitim, A., "Irrigation et salinisation au sahara algérienne", Secheresse, V.5, n°3, (1994), 151-160.
53. Abbad. M, 2007 : Comportement de la tomate cultivée dans un sol Salin et techniques d'aménagements. Thèse d'ingénieur d'Etat, USDB. Pp25.
54. Cheverry, C., et Bourrié, G., "La salinisation des sols", S.Gelin, INRA, (1998), 19p

55. Ashraf, M. Foolad M.R.( 2005): Pre-sowing seed treatment-a shotgun approach to improve germination, plant growth, and crop yield under saline and non-saline conditions. *Advances in Agronomy*, 88: 223-271.
56. Madhava Rao K.V, Raghavendra A.S., Janardhan Reddy K. (2006): *Physiology and Molecular Biology of Stress Tolerance in Plants*. P41-99.
57. Z.Bouzid, Étude de l'effet de la salinité et de la présence du molybdène sur le comportement éco physiologique de deux variétés de plantes de l'espèce *Phaseolus vulgaris* L. Thèse Magister, Université Mentouri Constantine, (2010), 1178p.
58. Morsli B.: Étude de l'intrusion marine et de ses répercussions sur la dégradation des sols : cas des zones côtières d'Alger Est. Actes des JSIRAUF(2007).
59. Urban, L., "Introduction à la production sous serre", Maison Rustique, Paris, (1997), 180p.
60. Maillard .J : Le point sur l'Irrigation et la salinité des sols en zone aride : Risques et Recommandations. Handicap International. Novembre 2001. 35p
61. Khechai. S, 2001: contribution à l'étude du comportement hydrophysique des sols du périmètre irrigué de l'ITDAS dans la plaine de l'outaya (W.Biskra), Thèse de magister science agronomique. Université de Biskra. Pp 145.
62. Shainberg et Letey, 1984 in Saidi, 1992 : Etude expérimental de la stabilité structurale des sols des plaines de Chélif. Thèse du Magister. 8-18. pp
63. Robert. M, 1996 : le sol : interface dans l'environnement ressource pour le développement. Ed. Masson .paris.244p.
64. Hayashi et Murata, 1998: NaCl stress causes changes in photosynthetic pigments, proteins and other metabolic components in the leaves of a true mangrove, *Bruguiera arvilla*, in hydroponic cultures. *J. Plant Biol.* 45, 28–36.
65. Allakhverdiev et al. 2000b in Parida et Das, 2005: Salt tolerance and salinity effect on plants: review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. Vol.60, pp. 324-349.
66. Diehil, R., "Agriculture générale", J.B. Baillière, Paris, (1975), 400p.
67. Wang Y., Nil N. (2000): Changes in chlorophyll, ribulose biphosphate carboxylase– oxygenase, glycine betaine content, photosynthesis and transpiration in *Amaranthus tricolor* leaves during salt stress. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 75, 623–627.

68. Chartzoulakis K., Klapaki G, 2000: Response of two green house pepper hybrids to NaCl salinity during different growth stages. *Sci. Hortic.* 86, 247–260.
69. Mohammad M., Shibli R., Ajouni M., Nimri L. (1998): Tomato root and shoot responses to salt stress under different levels of phosphorus nutrition. *J. Plant Nutr.* 21, 1667–1680.
70. Meloni D.A., Oliva M.A., Ruiz H.A., and Martinez C.A. 2001: Contribution of proline and inorganic solutes to osmotic adjustment in cotton under salt stress. *J. Plant Nutr.* 24, 599–612.
71. Parida A.K., Das A.B: Salt tolerance and salinity effect on plants: review. *Ecotoxicology and Environmental Safety.* (2005) Vol.60, pp. 324-349.
72. Agastian. P, Kingsley S.J, Vivekanandan M. (2000): Effect of salinity on photosynthesis and biochemical characteristics in mulberry genotypes. *Photosynthetica* 38, 287–290.
73. Kennedy et De Fillippis, 1999: Role of proline, K/Na ratio and chlorophyll content in salt tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Pak. J. Bot.*, 41(2): 633- 638.
74. Parida A., Das A.B., Das P.: NaCl stress causes changes in photosynthetic pigments, proteins and other metabolic components in the leaves of a true mangrove, *Bruguiera ariflora*, in hydroponic cultures. *Jurnal Plant and Biology.* (2002) 45, 28–36.
75. Agastian. P, Kingsley S.J., Vivekanandan M. (2000): Effect of salinity on photosynthesis and biochemical characteristics in mulberry genotypes. *Photosynthetica* 38, 287–290.
76. Hernandez, 1999: Alleviation of Salt Stress in Common Bean (*Phaseolus vulgaris*) by Exogenous Abscisic Acid Supply. *Journal of Plant Growth Regulation.* 25:110–119.
77. Mitsuya , 2000: Effet du stress salin sur l'accumulation de la proline et des sucres solubles dans les feuilles de trois porte-greffes d'agrumes. *Fruits.* Vol. 57, no5-6, pp. 335-340.
78. Munn et Termatt, 1986: Avenues for increasing salt tolerance of crops, and the role of physiologically based selection traits. *Plant and Soil* 247: 93–105.
79. Kao, 2001: Signal transduction pathways under abiotic stress in plants. *Current Science*, Vol.88, N°11, pp.1771-1779

80. Khadri M., Tejera N. A., and Lluch C. (2006): Alleviation of Salt Stress in Common Bean (*Phaseolus vulgaris*) by Exogenous Abscisic Acid Supply. *Journal of Plant Growth Regulation*. 25:110–119.
81. Iyengar et Reddy: Responses of Plant to Environmental Stress Chilling, Freezing and High Temperature Stresses, 2<sup>nd</sup> edn. Levitt, J. (ed.). Academic Press, New York,
82. Bohnert et Jensen, 1996: Effect of salinity on stomatal conductance, photosynthetic capacity, and carbon isotope discrimination of salt tolerant (*Gossypium hirsutum* L.) and salt-sensitive (*Phaseolus vulgaris* L.) C3 nonhalophytes. *Plant Physiol*. 95: 628-635.
83. Calu, 2006 : *Arabidopsis thaliana* et *Thellungiella halophila*, plantes modèles dans l'étude du stress salin. Spectro Sciences.
84. Gama P. B. S., Inanaga S., Tanaka K., Nakazawa R. (2007): Physiological response of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seedlings to salinity stress. *African Journal of Biotechnology* Vol. 6 (2), pp. 079-088.
85. Berthomieu P., Conéjéro G., Nublath A., Brackenbury W.J., Lambert C., Savio C., Uozumi N., Oiki S., Yamada K., Cellier F., Gosti F., Simonneau T., Essah P.A., Tester M., Veyrier A-A, Sentenac H., Casse F. (2003): Functional analysis of AtHKT1 in *Arabidopsis* shows that Na<sup>+</sup> recirculation by the phloem is crucial for salt tolerance. *Embo Journal* 22, 2004-2014 *Biotechnology* 16, 123–132.
86. Zhu J.K. (2003): Regulation of ion homeostasis under salt stress. *Curr. Opin. Plant Biol.* 6, 41–45.
87. Cheeseman, 1988 in Parida et Das, 2005: Physiology and Molecular Biology of Stress Tolerance in Plants. P41-99.
88. Apse , 1999: Le point sur l'Irrigation et la salinité des sols en zone aride : Risques et Recommandations. Handicap International. Novembre 2001. 35p
89. Zhifang et Loescher, 2003: Toxicity of the Salt and Pericarp Inhibition on the Germination of Some Atriplex Species. *American-Eurasian Journal of Toxicologic Sciences* 1 (2): 43-49.
90. Singh, 2000: Effect of nitrogen deficiency, salinity and drought on proline metabolism in *Sesuvium portulacastrum*. *Biosaline Agriculture and Salinity Tolerance in Plants*. Pp. 65-72.

91. Wang et Nil, 2000 : Effet du stress salin sur l'accumulation de la proline et des sucres solubles dans les feuilles de trois porte-greffes d'agrumes. *Fruits*. Vol. 57, no 5-6, pp. 335-340.
92. Pilon-Smits, 1995 : Les indicateurs précoces de tolérance à la salinité chez les blés durs. p.151. *Biotech2008 Xles Journées Scientifiques du réseau "Biotechnologies végétales / Amélioration des plantes et sécurité alimentaire"* de l'Agence universitaire de la Francophonie. 30 juin 3 juillet 2008, Agrocampus Rennes. Rennes, France. 215 p.
93. Bohnert H.J., Nelson D.E., Jensen R.G., Adaptations to environmental stress, *Plant Cell* 7 (1995) 1099–1111.
94. Gadallah, 1999 : Acides aminés totaux et inhibition de la phytotoxicité du Cadmium par le Zinc. *Arch. Inter. Physiol. Biochem.*, 96 (5):41.
95. Khavari Njad R.A. & Mostafi Y., 1998, Effects of NaCl on photosynthetic pigments, saccharides and chloroplast ultra structure in leaves of tomato cultivars. *Photosynthetica*, 35, 1, 151-154
96. Aubert et al, 1999: Physiological and biochemical responses of two precocious varieties of wheat to phosphate rocks and TSP fertilisation in semi-arid land. *Proc XIVth. International Plant Nutrition Colloquium*, July 27- August 03-2001, Hannover, Germany.
97. Mattioni, 1997, in Parida et Das, 2005: Contribution of proline and inorganic solutes to osmotic adjustment in cotton under salt stress. *J. Plant Nutr.* 24, 599–612.
98. Bohert et Jensen 1996: Salinity and nitrogen effects on photosynthesis, ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase and metabolite pool sizes in *Phaseolus vulgaris* L. *Plant physiology* Vol. 82, No 2, pp. 555-560.
99. Messedi D., Abdelly C., 2004. Physiologie de la tolérance au sel d'une halophyte de recouvrement: *Batis maritima*. *Revue des Régions Arides*, Tome 1, No spécial : 192-199.
100. Cushman, 1989: Role of lipids and fatty acids in stress tolerance in cyanobacteria. *Acta Protozool.* 41, 297–308.
101. Zhu and Meinzer, 1999 in Parida et Das, 2005 Salt and drought stress signal transduction in plants. *An. Rev. Of Plant Biol.* 53: 247- 73.

102. Beltran, 1999: sols interface fragile. Ed: INRA, Paris. 88-100 pp
103. FAO, 2002 : Le sel de la terre: un danger pour la production vivrière. Pp 1.3
104. Bourakhoudar et Badraoui ; 2002
105. Mekki. M, 1988: l'irrigation goutte à goutte. Edition : office de publication universitaire.338 p.
106. Soltner, D., "Les bases de la production végétale", Tome II. Le sol, Coll. Sci. Agro, (1988), 453p.
107. binet. P, Brunel. J.P ; 1967 : « Physiologie végétale », Tome I, Ed. Doin, Paris, 238p.
108. Brun. S et Settembrine. A, 1994 : Ross hors-sol sous serre, gestion de la nutrition minérale et hydrique ; P.H.M. R vue horticole N°345. 25-29.
109. Wacquant, 1998 : les besoins en eau et irrigation des cultures sous serre. Info CTIFL n°145. 40-43.
110. Lafon, J.P., Tharaud-Prayer, C., "Biologie des plantes cultivées", Ed.2, Ed. Lavoisier Tec. Et Doc., Paris, (1996), 233p.
111. S.B. El Alaoui, 2009 : Référentiel pour la conduite technique de tomate. Pp 15
112. Al allaoui. S.B, 2000 : Fertilisation Minérale des Cultures » maladies des plantes, agriculture et écologie
113. Schwarz M., 1985. The use of saline water in hydroponics. Soiless Culture. Pp 26-34.
114. Smirnov et al, 1997 : "Water stress induced changes in concentrations of proline and total soluble sugars in nodulated alfalfa (*Medicago sativa*) plants", *Physiol. Plant.* 84, (1992), 55-60.
115. Diehil, R., "Agriculture générale", J.B. Baillièrre, Paris, (1975), 400p.
116. Michaud et Boudreau, 2001 Michaud, N. et Boudreau, M.E., "La culture hydroponique", Agriculture Canada Publication, Ottawa, (2001), 52p.
117. Huguet, C., et Coppenet, M., "Le magnésium en agriculture", Ed. INRA, (1992), 270p.
118. Musard, M "Qualité de la tomate de serre : conduite de l'alimentation hydrominérale en culture sur substrat", C.T.I.F.L, Paris, (1990), 21-26.
119. Chouard, P., "Les cultures sans sol, Maison Rustique, Paris, (1952), 200p.
120. Marris. P et Devitt. L, 2006 : les fertilisations autres que les fumiers et le compostes. Pp 1-8.

121. Bot. J, Adamovicz. S, 2008: altering young tomato plant growth by nitrate and CO<sub>2</sub> preserve the proportionate relation linking long- term organic nitrogen accumulation to intercepted radiation. *New physiologist* 180. 663.672.
122. Loue, A., « Les oligo-éléments en agriculture », Ed Agri Nathan international, Paris, 1986, 339p.
123. Snoussi, S.A., “Valorisation des eaux salines pour la nutrition des plantes cultivées”, Thèse Doctorat, INA El-Harrach, (2001), 152p.
124. Coic, Y., et Lesaint, C., “La nutrition minérale en eau des plantes e hoticulture avancée”, Document technique S.C.P.A, n°23, Versailles, (1975), 21p.
125. Francis et al (1970) : Cooper enzymes in isolated chloroplastes. *Plant Physiol.*, 24 (1949), pp.1-15.
126. Dubois M., Gillet K.A. (1965): Dosage des sucres totaux à l’ortho–toluidine, *J. Agr.Food Chem.* 13 : 137
127. Monneveux, Ph. & Nemmar, M. (1986). - Contribution à l’étude de la résistance à la sécheresse chez le blé tendre (*Triticum aestivum* L.) et chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.): Etude de l’accumulation de la proline au cours du cycle de développement. *Agronomie*, 6 (6), pp. 583-590.
128. Ben ahmed .H, A. Manaa, E. Zid, 2008 : Tolérance à la salinité d’une poaceae à cycle court : la sétairie (*Setaria verticillata* L.) ; *Compte rendus Biologies* 331 pp 164–170.
129. Snoussi, S.A., et Halitim, A., “Valorisation des eaux salines pour la nutrition minérale des plantes cultivées”, *Etude et Gestion des Sols*, 5, 4, (1998), 289 - 298.
130. Diehil, R., “Agriculture générale”, J.B. Baillière, Paris, (2001), 400p.
131. T-k. Ould Djeh, N. Dali, T. Bettaieb, A. Ben Salah 2006, Influence métabolique du CO<sub>2</sub> atmosphérique sur la tomate cultivée en milieu saumâtre. *Cahiers Agricultures*. Volume 15, Numéro 5, 441-7, Septembre-Octobre 2006.
132. Hopkins, W., « Physiologie végétale », 2<sup>ème</sup> édition, Ed de boeck et Larcier s.a, Bruxelles, 2003, 514P.
133. Ayers, R.S., Westcot, D.W., “La qualité de l’eau en agriculture”, *Bull. d’irrigation et de drainage*, F.A.O. n° 29, Rome, (1976), 95-97.
134. El Midaoui M., Benbella M., Aït Houssa A., Ibriz M., Talouizte A. (2007): Contribution à l’étude de quelques mécanismes d’adaptation à la salinité chez le tournesol cultivé (*Helianthus annus* L.). *Revue HTE* N° 136, pp.29-34.

135. Balibrea et al, 1997 Balibrea M. E., Cayuela E., Artés F. and Pérez Alfocea F., 1997. Salinity effects on some postharvest quality factors in a commercial tomato hybrid. *Journal of Horticultural Science*, **72** (6) pp 885-892.
136. Satti S. M. E., Lopez M. and Al-Said A., 1994. Salinity induced changes in vegetative and reproductive growth in tomato. *Commun. Soil Sci. Pant Anal.*, 25 (5 et 6), pp 501-510.
137. Qian Y.L., Wilhelm S.J., Marcum K.B., 2001. Comparative responses of two Kentucky bluegrass cultivars to salinity stress. *Corp Science*, Vol. 41: 1895-1900.
138. Keller F. Ludlow M.M., 1993. Carbohydrate metabolism in drought-stressed leaves of *Pigeonpea (Cajanus cajan)*. *Journal of Experimental Botany*, Vol.44, No. 265: 1351-1359.