

DÉPARTEMENT D'AGRONOMIE

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté par :

Menad Aya

Cheurfi Ilhem

Pour l'obtention du diplôme de Master en agronomie

Spécialité : Production végétale

THÈME

**Utilisation de l'Azolla comme biofertilisant sur deux variétés de tomate (*Solanum lycopersicum* L.)**

Devant le Jury :

Président : Benguendouz Abdenour MCA Université AIB Mostaganem

Examineur : Meliani Hadj Ahmed MAA Université AIB Mostaganem

Encadreur : Arbaoui Mohamed MCA Université AIB Mostaganem

Année Universitaire : 2024/2025



---

---

## Remerciements

*Nous rendons grâce à Dieu Tout-Puissant qui nous a accordé la force, la patience et la volonté nécessaires à l'accomplissement de ce travail.*

*Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadreur, **M. Arbaoui M.**, pour son accompagnement, ses orientations pertinentes et ses précieux conseils tout au long de ce mémoire.*

*Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres du jury, **M. Benguendouz Abdenour**, et **M. Meliani Haj Ahmed** pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer ce travail et pour leurs remarques constructives et enrichissantes.*

*Nos remerciements vont aussi à l'ensemble des enseignants du département d'**Agronomie, spécialité Production Végétale**, pour la qualité de leurs enseignements et pour nous avoir transmis le goût de la recherche*





## Dédicaces

*À toi, ma douce maman*

*Ton amour inconditionnel, tes sacrifices silencieux et tes prières incessantes ont été ma lumière dans les moments les plus sombres. Tu as porté mes rêves comme les tiens, tu as essuyé mes larmes avant même qu'elles ne coulent, et tu as su me donner la force de continuer quand je pensais tout abandonner. Ce travail est le fruit de ton amour, il est à toi avant même d'être à moi.*

*À toi, mon cher beau-père...*

*Ta présence rassurante, tes sages conseils et ton soutien discret mais constant ont été une seconde chance que la vie m'a offerte. Ton respect, ton encouragement et ton rôle bienveillant à mes côtés resteront gravés à jamais dans mon cœur.*

*À vous deux, je dédie ces pages comme un humble témoignage de mon amour éternel et de ma gratitude infinie.*



*Menad Aya*



## Dédicaces

*À mes chers parents, pour leur amour inconditionnel,  
leurs sacrifices et leurs prières constantes.*

*À mes frères et sœurs, pour leur soutien et leur  
encouragement.*

*À mon époux bien-aimé, compagnon de vie et source de  
force.*

*À mes amis fidèles, pour leur présence et leurs  
encouragements tout au long de ce parcours.*

*Je dédie ce modeste travail avec toute ma gratitude*



## Résumé

L'utilisation des biofertilisants en agriculture est devenue une réalité environnementale et économique. Cette étude a évalué l'effet de l'Azolla, seule ou combinée avec le NPK, sur deux variétés de tomate (*Ksi-Rosa* et *Sereen FI*). Les résultats obtenus ont montré que l'Azolla comme biofertilisant a amélioré la croissance végétative et la productivité de la tomate. Le mélange **Azolla + NPK** a donné les meilleurs résultats pour la majorité des paramètres étudiés (longueur de la tige, nombre de fleurs, poids et rendement des fruits), confirmant ainsi une synergie entre l'action rapide des engrais minéraux et l'effet durable du biofertilisant. La variété *Sereen FI* a mieux réagi à l'association que *Ksi-Rosa*, produisant des rendements plus élevés. Dans l'ensemble, l'utilisation de l'Azolla apparaît comme une alternative écologique et durable, capable de réduire la dépendance aux engrais chimiques tout en maintenant une productivité agricole élevée.

**Mots clés :** Azolla, biofertilisant, NPK, tomate, croissance, rendement.

## **Abstract**

The use of biofertilizers in agriculture has become an environmental and economic reality. This study evaluated the effect of Azolla, alone or combined with NPK, on two tomato varieties (Ksi-Rosa and Sreen F1). The results obtained showed that Azolla as a biofertilizer improved vegetative growth and productivity of tomatoes. The Azolla + NPK mixture gave the best results for the majority of the parameters studied (stem length, number of flowers, weight and fruit yield), thus confirming a synergy between the rapid action of mineral fertilizers and the lasting effect of the biofertilizer. The Sreen F1 variety responded better to the combination than Ksi-Rosa, producing higher yields. Overall, the use of Azolla appears to be an ecological and sustainable alternative, capable of reducing dependence on chemical fertilizers while maintaining high agricultural productivity.

**Key words:** Azolla, biofertilizer, NPK, tomato, growth, yield.

## ملخص

قيمت هذه الدراسة تأثير الأزولا، بمفردها أو بالاشتراك مع NPK، على صنفين من الطماطم Ksi-Rosa و Sreen F1. أظهرت النتائج أن الأزولا تحسّن النمو الخضري وإنتاجية الطماطم بفضل محتواها العالي من النيتروجين والفوسفور، اللذين يُطلقان تدريجيًا. وقد حقق خليط الأزولا + NPK أفضل النتائج في معظم المعايير المدروسة (طول الساق، وعدد الأزهار، ووزن الثمرة، والعائد)، مما يؤكد التآزر بين المفعول السريع للأسمدة المعدنية والتأثير طويل الأمد للسماح الحيوي.

استجاب صنف Sreen F1 للمزيج بشكل أفضل من Ksi-Rosa، مما أدى إلى إنتاجية أعلى. وبشكل عام، يبدو أن استخدام الأزولا بديل بيئي ومستدام، قادر على تقليل الاعتماد على الأسمدة الكيماوية مع الحفاظ على إنتاجية زراعية عالية.

**الكلمات المفتاحية:** أزولا، سماء حيوي، طماطم، نمو، إنتاجية، NPK

## SOMMAIRE

Remerciements

Dédicaces

Résumé

Sommaire

Abréviation

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction.....1

### **1<sup>ère</sup> Partie : Données Bibliographiques sur la tomate**

#### **Chapitre 1 : Étude de la culture de tomate**

1. Origine et historique de la tomate.....	2
2. Classification botanique .....	2
2.1. Variétés de la tomate .....	3
2.2. Appareil végétatif.....	3
Système racinaire.....	4
Tiges.....	4
Feuilles.....	4
Fleurs .....	5
Fruits .....	5
Graines .....	6
2.3. Cycle phénologique de la tomate .....	6
2.4. Besoins de la culture.....	7
Climat.....	7
Lumière .....	7
Sol.....	7
Irrigation.....	7
Fertilisation .....	8
3. Importance économique de la tomate .....	8
3.1. Dans le monde.....	8
3.2. En Algérie.....	9
3.3. En Mostaganem.....	9
4. Maladies et ravageurs de la tomate.....	10
4.1. Maladies cryptogamiques .....	11

4.2. Maladies bactériennes .....	12
4.3. Maladies virales .....	13
4.4. Principaux ravageurs .....	14

## **Chapitre 2 : Biofertilisants**

1. Généralités sur les biofertilisants	
1.1 Définition.....	15
1.2 Classification des biofertilisants .....	15
1.3 Composition chimique des biofertilisants .....	15
1.4 Types de biofertilisants .....	16
1.4.1 Les fumiers .....	16
1.4.2 Le compost .....	16
1.4.3 Les engrais (organiques, minéraux et organo-minéraux).....	16
1.5 Avantages des biofertilisants .....	17
1.6 Inconvénients des biofertilisants.....	17
2.1 Définition.....	18
2.2 Origine et distribution .....	20
2.3 Taxonomie.....	21
2.4 Description morphologique .....	22
2.5 Physiologie .....	22
2.6 Espèces d'Azolla.....	23
2.6.1 <i>Azolla filiculoides</i> .....	23
2.6.2 <i>Azolla pinnata</i> .....	
2.6.3 <i>Azolla caroliniana</i> .....	24
2.6.4 <i>Azolla mexicana</i> .....	25
2.6.5 <i>Azolla microphylla</i> .....	25
2.7 Reproduction d'Azolla .....	26
2.8 Facteurs environnementaux affectant Azolla .....	26
2.8.1 Eau .....	26
2.8.2 Température.....	26
2.8.3 pH.....	27
2.8.4 Lumière .....	27
2.8.5 Besoins nutritionnels.....	28
2.9 Composition chimique de l'Azolla.....	28
2.10 Utilisation en agriculture .....	28

## 2<sup>ème</sup> Partie : Étude expérimentale

1. Objectif de l'essai .....	30
2. Zone et durée de l'expérience.....	30
3. Matériel et Méthode .....	31
3.1. Matériel végétal .....	31
3.2. Méthode d'étude.....	32
3.2.1. Mise en place de la culture d'Azolla.....	32
3.2.1.1 Construction des bassins .....	32
3.2.1.2. Culture d'Azolla .....	33
3.2.1.3. Irrigation d'azolla.....	34
3.2.2. Dispositif expérimental.....	34
3.2.3. Supports de culture.....	35
3.2.4. Mise en place de la culture.....	38
3.3. Préparation de la poudre d'azolla.....	40
• Séchage.....	40
• Broyage.....	41
3.4. Traitements appliqués (Azolla, NPK, Azolla + NPK).....	42
4. Analyse statistique .....	44

## 3<sup>ème</sup> Partie : Résultats et Discussion

1. Longueur de la tige .....	45
2. Nombre de fleurs par plant.....	46
4. Nombre de fruits par plant.....	47
5. Poids moyen du fruit.....	48
6. Rendement de fruits par plant.....	49

### **Discussion**

### **Conclusion**

### **Références bibliographiques**

## **Abréviations**

**MO** : Matière Organique

**MS** : Matière Sèche

**FAO**: Food and Agriculture Organization

**PH**: Potentiel Hydrogène

**CMV**: Cucumber Mosaic Virus

**N**: Azote

**P**: Phosphore

**K**: Potassium

**Ca**: Calcium

**Mg**: Magnésium

**Mn**: Manganèse

**Fe**: Fer

**Co**: Cobalt

**NPK** : Engrais minéral composé d'Azote (N), Phosphore (P) et Potassium (K).

**TE** : Teneur en eau.

**Pp** : Planche à production.

**dl** : Degré de liberté (degree of freedom).

**F** : Valeur du test de Fisher (ANOVA).

**SD** : Standard Deviation (Écart type).

**ITA** : Institut Technique Agricole.

**%** : Formule de calcul de pourcentage

**G** : Gramme

## Liste des figures

<b>Figure 1</b> : Planche de tomate dessinée par Mattioli en 1590, édition Dioscorides, Allemagne...	2
<b>Figure 2</b> : Système racinaire de la tomate .....	4
<b>Figure 3</b> : Fleur de tomate .....	5
<b>Figure 4</b> : Cycle de développement de la tomate .....	6
<b>Figure 5</b> : Évolution de la production de tomate par pays .....	9
<b>Figure 6</b> : Évolution de la production et de la superficie nationale de tomate .....	9
<b>Figure 7</b> : Distribution moderne approximative d'Azolla .....	21
<b>Figure 8</b> : Azolla fougère.....	22
<b>Figure 9</b> : Azolla filiculoides .....	23
<b>Figure 10</b> : Azolla pinnata .....	24
<b>Figure 11</b> : Azolla caroniliana.....	24
<b>Figure 12</b> : Azolla mexicana .....	25
<b>Figure 13</b> : Azolla microphylla .....	25
<b>Figure 14</b> : Situation géographique de la ferme expérimentale de l'ITA – Mostaganem. ....	30
<b>Figure 15</b> : Récipient rempli de terre.....	32
<b>Figure 16</b> : Bassin rempli d'eau.....	33
<b>Figure 17</b> : Azolla.....	33
<b>Figure 18</b> : Bassin après la culture d'Azolla.....	34
<b>Figure 19</b> : Préparation des échantillons pour le calcul de la capacité au champ (Originale, 225).....	36
<b>Figure 20</b> : Échantillons de terre de culture.....	36
<b>Figure 21</b> : Plateaux remplis prêt pour l'expérimentation.....	38
<b>Figure 22</b> : Terreau utilisé pour l'expérimentation. ....	38
<b>Figure 23</b> : Semis de graine de tomate.....	39
<b>Figure 24</b> : Paillage après le semis.....	39
<b>Figure 25</b> : Apparition des premiers cotylédons.....	40
<b>Figure 26</b> : Azolla sèche.....	41
<b>Figure 27</b> : Azolla poudre.....	41
<b>Figure 28</b> : Opération de mesure de la longueur de la tige pour les deux variétés de tomate. ....	43
<b>Figure 29</b> : Longueur de la tige de deux variétés de tomate traitées avec (NPK, NPK+Azolla et Azolla).....	45

<b>Figure 30</b> : Nombre de fleurs par plant de deux variétés de tomate traitées avec (NPK, NPK+Azolla et Azolla). .....	46
<b>Figure 31</b> : Nombre de fruits par plant de deux variétés de tomate traitées avec (NPK,NPK+Azolla et Azolla).....	47
<b>Figure 32</b> : Poids moyen de fruits en grammes de deux variétés de tomate traitées avec (NPK, NPK+Azolla et Azolla). .....	48
<b>Figure 33</b> : Rendement de fruits par plant de tomate (g) traitées avec (NPK, NPK+Azolla et Azolla). .....	49

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1</b> : Classification botanique de la tomate .....	3
<b>Tableau 2</b> : Maladies cryptogamiques de la tomate .....	11
<b>Tableau 3</b> : Maladies bactériennes de la tomate .....	12
<b>Tableau 4</b> : Maladies virales de la tomate .....	13
<b>Tableau 5</b> : Les principaux ravageurs de la tomate.....	14
<b>Tableau 6</b> : Définitions des types d'engrais.....	17
<b>Tableau 7</b> : Différence entre engrais et biofertilisants .....	19
<b>Tableau 8</b> : Principaux minéraux de l'Azolla spp .....	28
<b>Tableau 9</b> : Caractéristiques du matériel végétal utilisé.....	31
<b>Tableau 10</b> : Traitements de l'Azolla poudre chaque plante.....	42
<b>Tableau 11</b> : Traitements NPK chaque plante.....	42
<b>Tableau 12</b> : Traitements NPK + Azolla chaque plante.....	43
<b>Tableau 13</b> : ANOVA à deux facteurs avec $p=5\%$ de la longueur de la tige de deux variétés de tomate traitées avec (NPK, NPK+Azolla et Azolla).....	45
<b>Tableau 14</b> : ANOVA à deux facteurs avec $p=5\%$ du nombre de fleurs par plant de deux variétés de tomate traitées avec (NPK, NPK+Azolla et Azolla).....	46
<b>Tableau 15</b> : ANOVA à deux facteurs avec $p=5\%$ du nombre de fruits par bouquet de deux variétés de tomate traitées avec (NPK, NPK+Azolla et Azolla).....	47
<b>Tableau 16</b> : ANOVA à deux facteurs avec $p=5\%$ du poids de fruits de deux variétés de tomate traitées avec (NPK, NPK+Azolla et Azolla).....	48
<b>Tableau 17</b> : ANOVA à deux facteurs avec $p=5\%$ du rendement par plant de tomate en grammes de deux variétés traitées avec (NPK, NPK+Azolla et Azolla).....	49

## Introduction

---

### Introduction

La tomate (*Solanum lycopersicum* L.) est l'une des cultures maraîchères les plus répandues et les plus consommées dans le monde. Elle occupe une place stratégique aussi bien sur le plan économique que nutritionnel, en raison de sa richesse en vitamines, minéraux et antioxydants bénéfiques pour la santé humaine (Heuvelink, 2005). Selon la FAO (2021), la production mondiale de tomate dépasse 180 millions de tonnes, ce qui en fait l'une des principales cultures légumières. En Algérie, la tomate constitue également une culture de grande importance, destinée à la consommation fraîche comme à la transformation industrielle.

La productivité de la tomate est étroitement liée à la gestion de la fertilisation. Les engrais minéraux tels que le NPK (azote, phosphore et potassium) sont couramment utilisés pour répondre rapidement aux besoins nutritifs de la plante. Toutefois, leur usage excessif entraîne plusieurs inconvénients, notamment la dégradation de la fertilité des sols, la pollution des nappes phréatiques et une augmentation des coûts de production (Giller et al., 2002). Ces contraintes soulignent la nécessité de recourir à des alternatives durables permettant de concilier rendement agricole et respect de l'environnement.

Dans ce contexte, l'*Azolla*, une fougère aquatique symbiotique avec la cyanobactérie *Anabaena azollae*, représente une option prometteuse en tant que biofertilisant naturel. Grâce à sa capacité de fixer l'azote atmosphérique et à sa richesse en phosphore et en oligo-éléments, l'*Azolla* contribue à améliorer la fertilité des sols et à accroître la productivité des cultures (Lumpkin & Plucknett, 1980 ; Raja et al., 2012). En plus de son rôle fertilisant, l'*Azolla* améliore la structure du sol, augmente sa teneur en matière organique et réduit la dépendance aux engrais chimiques (Brasset et al., 2005 ; Ojetayo et al., 2011).

Plusieurs études ont montré que l'utilisation de l'*Azolla*, seule ou en combinaison avec des engrais minéraux, améliore la croissance végétative, le rendement et la qualité des fruits de différentes cultures, notamment la tomate (Yao et al., 2018 ; Seleiman et al., 2022 ; Thapa Poudel, 2021). L'association *Azolla* + NPK apparaît particulièrement intéressante, car elle combine l'action rapide et immédiate des éléments minéraux du NPK avec l'apport progressif et durable des nutriments libérés par la décomposition de l'*Azolla*.

**1<sup>ère</sup> Partie :**

**Données Bibliographiques sur la tomate**

## Chapitre 1. Étude de la culture de la tomate

### 1. Origine et Historique

Les premières tomates proviennent des régions andines de la côte nord-ouest d'Amérique du Sud où diverses espèces, dont *Solanum lycopersicum cerasiforme* (la tomate cerise) et *Solanum pimpinellifolium*, se multiplient spontanément.

Il semble que sa domestication ait eu lieu au Mexique :

Les tomates à gros fruits existaient déjà lors de la conquête du pays par les Espagnols en 1519. Ceux-ci l'introduisirent rapidement en Europe, mais d'abord comme ornement pour jardins et tonnelles - les plants étaient alors arborescents - car du fait de son apparentement à la belladone (*Atropa belladonna*), bien connue pour sa toxicité, elle fut jugée non comestible. Puis elle fut ajoutée en Espagne au gaspacho (soupe andalouse de légumes crus consommée froide). Elle conquiert ensuite l'Italie. Ce n'est que vers la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle qu'elle entra dans la cuisine française (le catalogue Vilmorin-Andrieux la classe encore comme plante ornementale en 1760) (**Sacim, 2012**).

La culture de la tomate en Algérie a été introduite au début du XX<sup>e</sup> siècle, principalement par des cultivateurs espagnols venus du sud de l'Espagne, appelés « tomateros », qui ont implanté la culture dans la région d'Oran vers 1905. Par la suite, la culture s'est étendue vers le centre du pays, notamment sur le littoral algérois (**Rekibi, 2014**).



**Figure 1** : Planche de tomate dessinée par **Mattioli** en 1590, édition Dioscorides, Allemagne

## 2. Classification botanique

La tomate cultivée *Lycopersicon esculentum* est une espèce diploïde avec  $2n = 24$ .

Il existe de nombreuses mutations génétiques uniques dans le chromosome, dont certaines. C'est très important pour la sélection. C'est une plante autogame, mais vous pouvez en avoir les plantes peuvent exprimer le taux de pollinisation croisée des plantes pollinisation croisée (**Gallais et Bannero, 1992**).

Les tomates appartiennent à la famille des Solanacées. En 1753, le botaniste Linné Nommé *Solanum lycopersicon*, mais Philip Miller l'a remplacé par Linné 15 ans plus tard Aux tomates (**Valimunizigha, 2006**).

**Tableau 1** : Classification botanique de la tomate (**Cronqutst, 1981**)

Règne	<i>Plantae</i>
Sous règne	<i>Trachenobionta</i>
Division	<i>Magnoliophyta</i>
Classe	<i>Magnoliopsida</i>
Sous classe	<i>Asteridae</i>
Ordre	<i>Solonales</i>
Famille	<i>Solanaceae</i>
Genre	<i>Solanum ou Lycopersicon</i>
Espèce	<i>Lycopersiconesculetum</i>

### 2.1 Variétés de La tomate

Selon le mode de fécondation, on distingue deux types de variétés de tomate :

#### a) Variétés fixées

Il existe plus de cinq cents variétés (conservant les caractéristiques parentales). Leurs fruits sont plus ou moins régulier, sensible aux maladies, mais produit généralement des fruits Excellent goût (**Poelse, 2007**).

**b) Variétés hybrides**

Les variétés hybrides sont plus nombreuses. Elles sont relativement récentes, puisqu'elles n'existent que depuis 1960 (Polese, 2007).

**2.2 L'appareil végétatif****• Le système racinaire**

Le système racinaire de la tomate est un réseau fibreux dense, essentiellement concentré dans les 20 premiers centimètres du sol, capable de s'étendre plus profondément dans un sol bien préparé (Shankara et al., 2005)



**Figure 2 :** Système racinaire de la tomate (Chaux et Foury, 1994)

**• Tiges**

Les tiges sont anguleuses, avec des entre-nœuds poilus. Il est herbacé dans les premiers stades de croissance et devient ligneux en vieillissant. La croissance unimodale initiale devient sympodiale après la formation de 4 ou 5 feuilles, c'est-à-dire Les bourgeons axillaires produisent des branches continues. d'autre part, Les bourgeons terminaux produisent des fleurs ou avortent. Ces branches issues des bourgeons axillaires donnent naissance à des feuilles à chaque nœud, et Se termine par une inflorescence (Chaux et Foury, 1994)

**• Feuilles**

Feuilles disposées en spirale, 15 à 50 cm de long et 10 à 30 cm de large. Les folioles sont ovées à oblongues, couvertes de poils glandulaires. Les grandes folioles sont parfois

pennatifides à la base. L'inflorescence est une cyme formée de 6 à 12 fleurs. Le pétiole mesure entre 3 et 6 cm (Naika, 2005).

- **Fleurs**

Bisexuel, régulier, entre 1,5 et 2 cm de diamètre. Ils poussent dans - où Entre les feuilles. Le tube du calice est court et poilu, et les sépales sont persistants. En général, il y a 6 pétales, mesurant jusqu'à 1 cm de longueur, qui sont jaunes et courbés lorsqu'ils sont ouverts.

Déjà mature. Il y a 6 étamines avec des anthères jaune vif entourant le style. Embout fin stérile. Ovaire supère, à 2 à 9 carpelles. En général, la plante est autogame, mais une pollinisation croisée peut également se produire. Abeilles et bourdons est le principal pollinisateur (Naika, 2005)



**Figure 3 : Fleur de tomate (Originale, 2025)**

- **Fruits**

Le fruit de la tomate est une baie charnue à la peau lisse et brillante. Selon la variété, la couleur des fruits mûrs varie (Chougar, 2011), allant du rouge profond au rose, bleu, orange, jaune et même blanc. Cette variété de couleurs est due à la présence de deux pigments principaux :

\*Pigment carotène : jaune.

\*Pigment lycopène : rouge (Chaux et Foury, 1994).

En principe, le fruit possède 2 chambres.

- **Grains**

Le nombre de graines varie de 80 à 500 graines par fruit. Elles sont recouvertes d'un mucilage qui présente à maturité un albumen et embryon à courbe, à germination épigée. (Chaux et Foury, 1994). Ils sont velus, brun clair 3-5 mm de long et 2-4 mm de large. L'embryon est enroulé dans l'endosperme. Le poids approximatif de 1000 graines est de 2,5 à 3,5 g (Martin, 2019)

### 2.3 Cycle phénologique de la tomate

Le cycle complet de la tomate (Fig. 06) s'étend en moyenne de 3,5 à 4 mois du semis jusqu'à la dernière récolte, à savoir 7 à 8 semaines de la graine à la fleur et 7 à 9 semaines de la fleur au fruit (Gallais et Bannerot, 1992).

Le cycle de développement d'un plant de cette espèce peut être décrit par trois grandes phases biologiques :

- La phase végétative qui correspond à la production phénologique exclusive d'organes végétatifs (feuilles et tiges) et elle comprise entre la levée et l'apparition de la première inflorescence.
- La phase reproductive qui correspond à la période de production des fleurs et des fruits et qui démarre à la floraison pour s'achever à la fin de la culture.
- La phase de maturation des fruits qui démarre sept à dix jours avant la récolte des premiers fruits et se termine à la récolte Athwrton et Rudich (1986) ; Huat (2008).



**Figure 4 :** Cycle de développement de la tomate (fr.dreamstime.com)

### 2.4 Besoins de la culture de tomate

Les conditions locales et les préférences variétales peuvent influencer les exigences de la culture de la tomate. Toutefois, voici quelques éléments essentiels à considérer. Pour une croissance fructueuse de la tomate :

- **Climat** : Les tomates s'adaptent à une large gamme de conditions climatiques, des températures tempérées vers un climat tropical chaud et humide (**Naika et al. 2005**).
- **Lumière** : Les tomates ont besoin de beaucoup de lumière pour pousser. L'exposition à la lumière est déterminée par la durée, l'intensité et sa qualité. La végétation a besoin de 1200 heures de soleil durant les 6 mois de croissance. Pour assurer une bonne nouaison, 14 heures de soleil par jour sont nécessaires (**Kinet, 1985**).
- **Sol** : Les tomates contiennent bonne capacité de rétention d'eau et bonne perméabilité à l'air. Ne contient pas de sel. Il préfère un sol limoneux profond et bien drainé. La surface du sol doit être perméable. Une profondeur de sol de 15 à 20 cm est bonne pour la croissance des plantes.

Une culture saine. Dans les sols lourds, un travail profond du sol permet une meilleure pénétration des racines.

Les tomates ont une large gamme de tolérance au pH (acidité), mais elles, varient entre 5,5 et 6,8, où l'apport en nutriments est assez et suffisant.

En général, l'ajout de matière organique stimule une bonne croissance. Contient beaucoup des matériaux organiques tels que la mousse de tourbe ne conviennent pas car en raison de sa grande capacité de rétention d'eau et de ses niveaux insuffisants nutriments (**Shankara et al., 2005**).

- **Irrigation** : Les tomates semblent être l'une des cultures les plus gourmandes en eau. Demande de tomates La superficie en champ ouvert est de 4 000 à 5 000 mètres cubes par hectare. Cycles de 90 à 120 jours avec un cycle mensuel de 400 à 600 mètres cubes par hectare. Les besoins en eau des tomates dépendent de l'environnement, Les plantes et leurs stades de développement (**Bentvelsen, 1980**)

Une irrigation fréquente et régulière, suivie d'un binage, peut permettre d'obtenir un rendement de production élevé. En revanche, un arrosage excessif pendant la floraison

peut entraîner. La chute des fleurs et une croissance excessive entraînent un retard de maturation des fruits (**Mouhouche, 1983**).

- **Fertilisation** : La quantité d'engrais appliquée varie d'une région à l'autre, notamment en fonction de la fertilité des sols, du climat et des techniques d'irrigation. D'une manière générale, le phosphore et des engrais organiques (fumier et autres) sont préparés Serré; 50 % de la potasse fournie avant la plantation et le reste fourni au cours des 10 à 12 mois suivants Les premières semaines d'agriculture. L'engrais azoté ne doit être appliqué qu'après le début de la plantation et pendant un mois maximum. Appliquer une fois toutes les deux semaines avant la récolte (**FAO, 1988**).

### **3. Importance économique de la tomate**

#### **3.1 Dans le monde**

Les tomates sont cultivées dans de nombreux pays à travers le monde (170, selon la FAO) et sont disponibles dans une variété des conditions climatiques, notamment dans les régions relativement plus fraîches, favorisent le développement des cultures sous couverture. C'est le premier légume mondial en termes de production, devant après la pastèque et le chou, mais derrière les pommes de terre et les patates douces (FAO, 2009).

La production de tomates connaît deux grandes filières : la tomate pour la consommation en frais (tomate de marché) d'une part et la tomate destinée à la transformation et la conserve (tomate d'industrie) d'autre part. Cette dernière représente environ la moitié de la production dans l'Union européenne, 80 % aux États-Unis (moyenne 1980-1987) et environ 15 % en Chine (2008). (**FAO, 2009**).

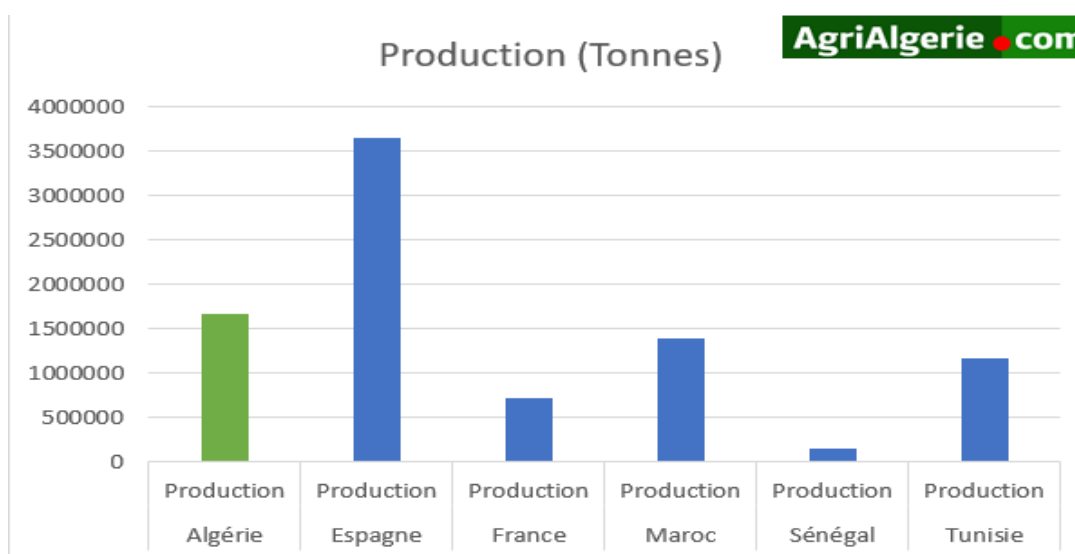


Figure 5 : Evolution de la production de tomate par pays (FAO, 2022)

### 3.2. En Algérie

La production mondiale de fruits a augmenté de plus de 182 millions de tonnes en 2017. Les coûts ont augmenté et la superficie a atteint 5 millions d’hectares. Évolution de la production et de la superficie nationale selon les statistiques de la FAO. Les résultats de la recherche consacrée à la culture de la tomate au cours de la période 1987-2017 ont été publiés dans Ci-dessous :

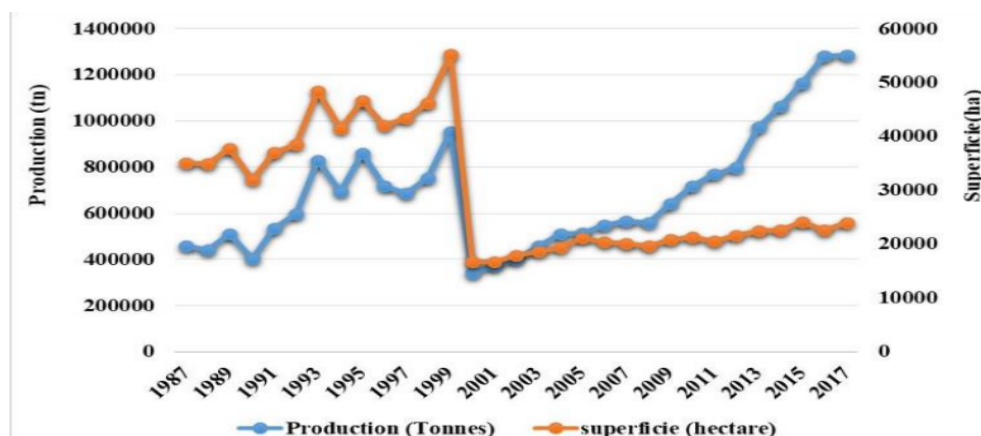


Figure 6 : Evolution de la production et la superficie nationale de tomate (FAO, 2018)

### 3.3. En Mostaganem

La production de tomate à Mostaganem est une activité agricole importante et bien développée, notamment le long du littoral de la wilaya qui s’étend sur environ 122 km, de la

Macta jusqu'à El Bahara dans la daïra de Achaâcha. Cette région bénéficie de conditions climatiques très favorables, avec des automnes et hivers doux, ce qui permet une culture maraîchère en champs et sous serres avec de bons rendements.

En 2020-2021, la wilaya de Mostaganem a produit environ 450 000 quintaux de tomates parmi une production totale de légumes de saison estimée à près de 6,5 millions de quintaux, dont une part importante provient des cultures sous serre. La production de tomates industrielles est aussi présente, avec des rendements pouvant atteindre 60 à 100 tonnes par hectare selon les techniques culturales employées.

#### **4. Principales maladies et ravageurs de la tomate**

Les cultures de tomates peuvent être attaquées par divers ravageurs (insectes, acariens, nématodes, etc.) et cryptogames, maladies bactériennes ou virales, Concurrence des adventices, accidents de végétation ou attaques abiotiques, Son importance varie selon le type de culture et les conditions climatiques. Les principaux ennemis de la culture de la tomate sont classés comme suit.

##### **4.1. Maladies cryptogamiques**

**Tableau 2** - maladies cryptogamiques de la tomate (Snoussi, 2010)

<b>Maladies</b>	<b>Agent causal</b>	<b>Symptôme et dégâts</b>
<b>Alternariose</b>	<i>Alternaria tomatophila</i>	Tâches noires de taille variables sur les feuilles
<b>Mildiou</b>	<i>Phytophthora infestans</i>	Grandes taches brunes sur les feuilles et les tiges
<b>Fonte de semi</b>	<i>Pythium spp (Rhizoctonia solani)</i>	Les semences peuvent pourrir avant la germination et les plantules peuvent pourrir avant la levée. Une pourriture brune se développe sur les racines et sur le bas des tiges, au niveau ou en dessous de la surface du sol, et les plantules infectées se flétrissent et s'effondrent rapidement
<b>Pourriture</b>	<i>Botrytis cinerea</i>	grise Feutrage gris sur les feuilles et sur les fruits
<b>Oïdium</b>	<i>Leveillula taurica</i>	Feutrage blanc sur feuilles
<b>Fusariose</b>	<i>Fusarium oxysporium f. sp. Lycopersici</i>	Flétrissement des feuilles avec brunissement des vaisseaux et pourriture des racines unilatérale suivi de dessèchement des feuilles de la base
<b>Anthracnose</b>	<i>Colletotrichum coccodes</i>	Tâches circulaires de 05 à 10 mm sur les fruits
<b>Verticilliose</b>	<i>Verticillium albo-atrum</i>	Flétrissement des feuilles accompagné d'un

## 4.2. Maladies bactériennes

Tableau 3- Maladies bactériennes de la tomate (SNOUSSI, 2010)

Maladies	Agent causal	Symptôme et dégâts
<b>Moelle noire</b>	<i>Pseudomonas corrugata</i>	Tige molle colorée en brun.
<b>Chancre bactérien</b>	<i>Clavibacter michiganensis</i>	Jaunissement, enroulement et flétrissement au bordure les feuilles. Jaunissement de la moelle en bordure des vaisseaux sur les tiges. La tige se fend.
<b>Gale bactérienne.</b>	<i>Xanthomonas spp</i>	Tâches nécrotiques noires sur les feuilles et sur les fruits.
<b>Flétrissement bactérien</b>	<i>Ralstonia solanacearum</i>	Flétrissement de la plante. Les racines et les parties basses de la tige deviennent brunâtres
<b>Moucheture de la tomate</b>	<i>Pseudomonas syringae pv. tomato</i>	-Taches noires sur les feuilles -Des taches brunes nécrotiques sur fruit

## 4.3. Maladies virales

Tableau 4 - Maladies virales de la tomate (Idrenmouche, 2011)

Maladies	Symptôme et dégâts
Virus de la mosaïque du tabac (TMV)	Transmis par la semence et par voie mécanique donnant des plages vert clair et vert foncé sur feuilles jeunes.
Wilt virus ou maladie bronzée. Tomato yellow leaf-cruf (TYLCV)	Les plantes atteintes ont une croissance ralentie ou même bloquée leurs conférant un aspect chétif : réduction des entre nœuds, aspect buissonnant, folioles de petite taille qui jaunissent et deviennent incurvé (cuillère). Et parfois filiforme. Les fruits sont petits et peu nombreux. Si l'infection est précoce la récolte est nulle
TICV (Tomato Infectious Chlorosis Virus)	Une jaunisse généralisée et un retard du développement de la plante avec apparition de nécroses ce qui entraîne de grandes pertes de rendement.
Virus de la maladie bronzée de la tomate (TSWV)	Mosaïque vert clair à vert foncé, des taches chlorotiques à nécrotiques, parfois en anneaux. Des plages rouge brun, plus nombreuses et confluentes à la base des folioles, qui deviennent légèrement enroulées.
Virus de la mosaïque du concombre (CMV)	Raccourcissement marqué des entre-nœuds, des pousses apicales qui lui confère un aspect compact et buissonnant. Leurs folioles sont petites et roulée vers le haut.. Les rendements sont considérablement réduits et les fruits sont peu nombreux, petits et maturité inégal

## 4.4. Les ravageurs

Tableau 5– Les principaux ravageurs de la tomate.

Ravageur	Ordre	Symptôme et dégâts
<b>La mineuse de la tomate</b> ( <i>T. absoluta</i> ) (Guenoui, 2008).	Lépidoptère	Feuilles perforées de long en large et large et forme des galeries grises ou blanches.
<b>La mouche blanche</b> ( <i>Aleurode Trialeurodes vaporariorum</i> ) (Westwood, 1856)	Hemiptère	Taches jaunes sur les feuilles. Feuilles s'enroulent sur elle-même. Transmission des virus TOCV, TICV et TYLCV.
<b>L'acarien rouge</b> <i>Tetranychus urticae</i> KOCHE, 1836).et <i>T. cinnabarinus</i> (Boisduval, 1867).	Trombidiformes	La face inférieure des folioles devient brune à bronzée. Sur fruit, la peau présente des craquelures
<b>Le puceron</b> <i>Macrosyphone euphorbiae</i> (Buninge, 1985). <i>persicae</i> (Sulze, 1776)	Hemiptère	Flétrissement et jaunissement des feuilles et des pousses. Retard des pousses et transmission de virus.
<b>La cicadelle</b> <i>Hialesther obsoletus</i>	Hemiptère	Zone sèche sue les limbes autour des points d'alimentation. Zone jaune sue les bords des feuilles.
<b>Le thrips</b> <i>Frankliniella schultzei</i> (Houamel, 2013).	Thysanoptère	Taches noires d'excréments sur le dessous des feuilles.
<b>Noctuelles</b> <i>Helicoverpa armigera</i> (Mazoulier et al, 2001).	Lépidoptère	Les chenilles endommagent le feuillage et pénètrent dans les fruits détériorant leur qualité. Les fruits deviennent invendables et impropres à la consommation

---

**Chapitre 2 : Biofertilisants****2. Généralités sur les biofertilisants****1.1. Définition**

Les biofertilisants sont des préparations contenant des cellules vivantes ou latentes de souches efficaces de micro-organismes qui aident les plantes cultivées à absorber les nutriments par des interactions dans la rhizosphère lorsqu'elles sont appliquées par les semences ou le sol. Ils accélèrent certains processus microbiologiques dans le sol et augmentent la disponibilité des nutriments sous des formes facilement assimilables par les plantes. (**Merzoug et Kada 2021**).

Les biofertilisants sont des préparations de micro-organismes appliquées au sol et aux plantes pour remplacer partiellement ou totalement les engrais de synthèse et réduire la pollution générée par les produits agrochimiques (**Zuang, 1982**). Les micro-organismes utilisés dans les biofertilisants se divisent en deux groupes :

- Le premier groupe comprend les micro-organismes capables de synthétiser des substances favorisant la croissance des plantes, de fixer l'azote atmosphérique, de dissoudre le fer et le phosphore inorganiques, et d'améliorer la tolérance au stress causé par la sécheresse, la salinité, les métaux lourds et l'utilisation excessive de pesticides.
- Le second groupe comprend les micro-organismes capables de réduire ou de prévenir les effets des micro-organismes pathogènes (**Faessel et al., 2015**).

**1.2. Classification des biofertilisants**

On classe les biofertilisants selon différents critères comme la provenance et le type de matières premières employées pour leur production, leur rôle, leur application ou encore le genre d'effets constatés. Il n'y a pas de consensus parmi les auteurs. **Ikrina et al. (2004)** suggèrent une division en 9 catégories, alors que **Torre et al. (2016)** identifient 5 catégories : les substances humiques, les extraits d'algues, les hydrolysats de protéines et acides aminés, ainsi que les sels inorganiques et les micro-organismes bénéfiques tels que les bactéries et les champignons.

**1.3. Composition chimique des biofertilisants**

La composition chimique des biofertilisants repose principalement sur la présence de micro-organismes vivants bénéfiques (bactéries, champignons, algues) et des substances

organiques ou minérales qui favorisent la croissance des plantes et améliorent la fertilité des sols.

#### **1.4. Type de Biofertilisants**

##### **1.4.1. Les fumiers**

Le fumier est une excellente source de nutriments pour les plantes, car la majeure partie de l'alimentation animale provient des plantes, et la majeure partie de celle-ci passe par les excréments. Ses propriétés physico-chimiques et biologiques en font un additif remarquable pour le sol. Selon Le fumier stimule la biomasse du sol en termes de quantité et d'activité et augmente la minéralisation de l'azote. En effet, l'activité microbienne (mesurée par l'activité enzymatique) et les niveaux de minéralisation de l'azote sont accrus. Ces effets se manifestent sur une courte période (une année de croissance). Dans ce cas, ils ont un impact moindre sur les stocks de carbone organique du sol (**Gérald et al., 2011**).

##### **1.4.2. Le compost**

Le compostage est un processus de décomposition et de transformation contrôlées de déchets organiques biodégradables d'origine végétale et/ou animale sous l'influence de diverses populations de micro-organismes (**Mark, 2015**). Les composts sont principalement utilisés en agriculture pour augmenter ou maintenir la concentration de matière organique dans le sol. Leur comportement une fois incorporé au sol dépend de la stabilité de leur matière organique (MO) (**Francou, 2004**). **Shafawati et Siddiquee (2013)** ont défini le compost comme un bio processus interdépendant qui convertit la matière organique en produits utiles par la décomposition de la matière organique sous l'influence de divers organismes ; micro- et macro-organismes combinant la récupération, le recyclage, le traitement et l'élimination des déchets naturels.

L'utilisation de composts en agriculture biologique est possible lorsque l'organisme de réglementation en reconnaît la nécessité. Les composts issus de fumier animal (sauf pour l'élevage hors-sol), de déchets verts et de déchets biologiques peuvent être utilisés en agriculture biologique. Cependant, ces composts doivent avoir une très faible teneur en métaux. Les composts peuvent servir de substrat de culture pour la production de semis de haute qualité, augmentant ainsi le succès des cultures après repiquage (**Ros et al., 2017**).

##### **1.4.3. Les Engrais**

Un engrais est une substance apportée au sol ou aux plantes pour fournir des éléments nutritifs essentiels à leur croissance, améliorer le rendement des cultures et renforcer leur

santé. Les engrais permettent de compenser les pertes de nutriments dans le sol dues à la culture et à l'érosion.

**Tableau 6.** Définitions des types d'engrais

<b>Types d'engrais</b>	<b>Définitions</b>
<b>Engrais Minéraux ou Engrais Chimiques</b>	Engrais d'origine minérale destinés à favoriser la croissance des plantes cultivées, produit par synthèse chimique, ou par l'exploitation de gisements naturels de phosphate et de potasse. La notion d'engrais minéral s'oppose à celle d'engrais organique, produits à base de matière organique d'origine animale ou végétale (CNABio, 2013)
<b>Engrais Organiques ou Engrais Biologiques</b>	Mélange de déchets d'origine animale ou végétale qui contiennent de l'azote, du phosphore et de la potasse, mais dans des proportions parfois moins importantes que dans un engrais minéral (CNABio, 2013).
<b>Engrais Organo-Minéraux</b>	Résultent du mélange d'engrais minéraux et d'engrais organiques. Ils doivent contenir au moins 1% d'azote d'origine organique (IFV, 2010).

### 1.5. Avantages des biofertilisants

De nombreux agriculteurs sont engagés dans l'agriculture biologique. Pour cultiver efficacement leurs cultures, ils disposent de solutions alternatives, notamment les biofertilisants, qui offrent de nombreux avantages :

- Les biofertilisants sont moins chers et plus écologiques que les fertilisants chimiques
- Quand ils sont appliqués sur un sol, les biofertilisants augmentent la disponibilité des nutriments et améliorent le rendement de 10 à 15 % sans nuire le sol et l'environnement
- Ils solubilisent l'insoluble forme des phosphates tels que les phosphates d'aluminium sous forme soluble
- Décomposition lente de la matière organique dans le sol
- Ils stimulent l'activité des êtres vivants du sol auxquels ils servent de nourriture

- Certains produits peuvent contenir des micro-organismes fixateurs d'azote
- Il existe des bio engrais qui augmentent le nombre des micro-organismes bénéfiques au sol et accélèrent le processus de la minéralisation de la matière organique
- Les extraits des plantes naturels sont utilisés dans les petites fermes de nombreux pays africains pour lutter contre les insectes ravageurs des grains, en raison des conditions économiques ne permettant pas l'utilisation de pesticides classiques

### **1.6. Inconvénients des biofertilisants**

Les biofertilisants nécessitent une attention particulière lors de leur stockage à long terme, car ils sont vivants et doivent être utilisés avant leur date de péremption. Si d'autres micro-organismes contaminent le substrat ou si les cultivateurs utilisent une souche inadaptée, leur efficacité sera réduite. Le sol doit contenir suffisamment de nutriments pour que les organismes responsables des biofertilisants puissent se développer et fonctionner. Les biofertilisants complètent les autres engrais, mais ne peuvent les remplacer entièrement. Ils perdent leur efficacité si le sol est trop chaud ou trop sec. Les sols excessivement acides ou alcalins entravent également la croissance des micro-organismes bénéfiques ; ils sont également moins efficaces si le sol contient un excès de leurs ennemis microbiens naturels. Les carences en certaines souches de micro-organismes ou en agents les plus efficaces limitent de plus en plus la disponibilité de certains biofertilisants [**Journal of environmental quality par delphine bossy futura-sciences publication initiale le 3 mai 2013**].

Tableau 7. Différence entre engrais et biofertilisants (Girard et al., 2011).

Biofertilisants	Engrais
<p>Dans le sol, des millions d'espèces d'organismes vivants agissent chaque jour pour mettent disposition de la plante des nutriments physiquement assimilables, favorisent ainsi son développement. L'agriculteur ancestral utilisait de ces principes permettant de ne pas appauvrir les sols et d'augmenter le taux de matière organique, avec des pratiques de rotation de culture ou de jachères. Les produits biofertilisants s'inspirent de ces méthodes : Les micro-organismes bénéfiques pour la vie du sol et des cultures sont favorisés tout en respectant la flore existante. Il est indispensable de remettre les biofertilisants au cœur de votre mode d'agriculture, d'autant qu'il s'agit d'alternatives tout aussi efficaces pour les meilleurs. Tant d'un point environnemental que pour le bien-être des individu</p>	<p>Les engrais sont très dangereux sur la qualité de l'environnement, et la biodiversité que sur la santé humaine. Ils révèlent que certains exposent une teneur élevée en acide comme l'acide sulfurique et l'acide chlorhydrique. Celle-ci entraînant la destruction de la bactérie fixatrice d'azote, qui aide à fournir l'azote à une plante en croissance. Ainsi, la première conséquence de l'utilisation des fertilisants chimiques dans le jardin est l'appauvrissement du sol.</p> <p><b>Sa nocivité :</b> Certains éléments s'avèrent en effet très polluants et se retrouvent directement dans les cours d'eau. En effet, les substances non assimilées par les plantes sont emportées par les pluies et celle-ci se déversant directement dans notre environnement. Ainsi, les engrais chimiques en raison de leurs produits chimiques nocifs ont un impact tant Ecologique que sur notre corps.</p>

## 2. Azolla

### 2.1. Définition

Azolla est une fougère aquatique, flottant à la surface des eaux calmes, tempérées ou tropicales, dans les cressonnières, les rizières, les étangs et dans les canaux d'irrigation. Elle abrite une cyanobactérie du genre *Anabaena* qui a la propriété de fixer l'azote, c'est-à-dire de transformer l'azote moléculaire de l'atmosphère en azote fixé assimilable par la plante jours (**Chander et al., 2017**).

L'*Azolla* est une espèce unique de fougère d'eau douce, l'une des plantes à la croissance la plus rapide de la planète grâce à sa relation symbiotique avec une cyanobactérie bleu-vert appelée *Anabaena*. Cette dernière absorbe l'azote atmosphérique pour fertiliser l'*Azolla* et fournit à *Anabaena* un habitat riche en azote dans les cavités de ses feuilles. Cela permet aux plantes de doubler leur biomasse en seulement deux jours, flottant librement dans une eau de seulement 2,4 cm de profondeur (**Jonhatan et Alexandra, 2019**).

### 2.2. Origine et distribution

On estime que la domestication de l'*Azolla* a débuté au 11<sup>ème</sup> siècle et qu'elle a été réalisée pour la première fois au Vietnam. Lamarck a botanisé le genre *Azolla* en 1783 (**Kannaiyan et Kumar, 2006**).

On distingue deux sous-genres pour les espèces d'*Azolla* : *Euazolla* et *Rhizosperma*. D'après les caractéristiques du sporocarpe, comme l'indiquent **Sood et al. (2007)**. Quelques autres écrivains emploient le niveau de la catégorie taxonomique plutôt que celui du sous-genre (**Saunders et Fowler, 1992**).

Sous-catégorie (section) Il existe cinq espèces d'*Azolla*, à savoir :

*A. caroliniana* Willd. *A. filiculoides* Lam., *A. mexicana* Presl. *A. microphylla* Kaulf et *A. rubra* R.Br. tandis que la section *Rhizosperma* ne compte que 2 espèces appelées *A. nilotica* et *A. pinnata* (**Raja et al, 2012**).

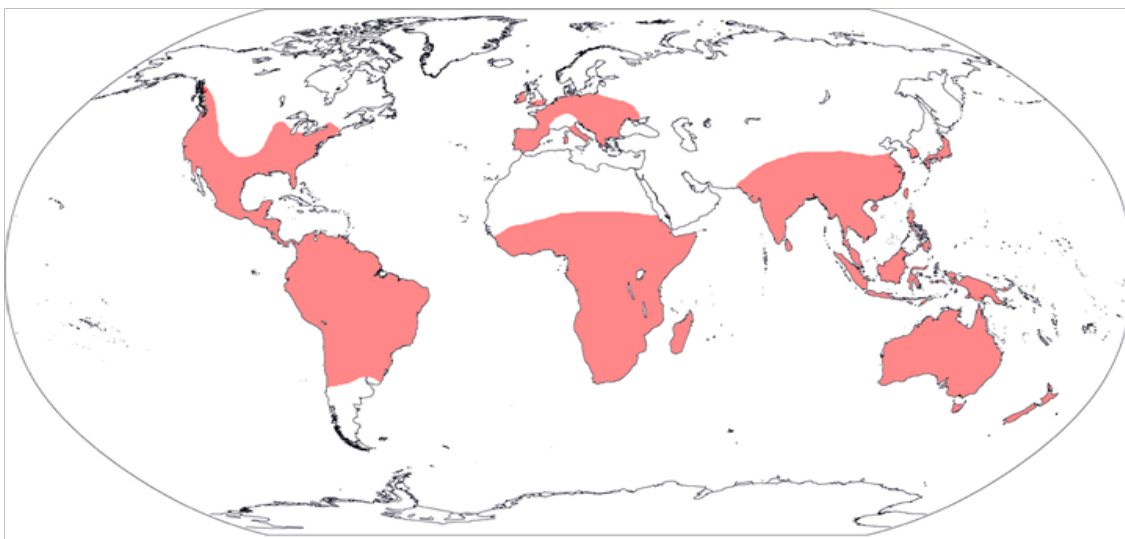
D'après **Kannaiyan et Kumar (2006)**, la distribution des espèces d'*Azolla* est en adéquation avec les écosystèmes d'eau douce des zones tempérées et tropicales à l'échelle mondiale Une analyse de la distribution d'*Azolla* a révélé que les espèces de la section *Euazolla* sont originaires de provenant d'Amérique du Nord et d'Amérique du Sud :

*A. filiculoides*, que l'on retrouve dans le sud de l'Amérique du Sud et l'ouest de l'Amérique du Nord jusqu'en Alaska ; *A. caroliniana*, présent à l'est de l'Amérique du Nord, en Amérique centrale, au nord de l'Amérique du Sud, dans les Caraïbes, au Mexique et aux Antilles ; *A.*

mexicana (**Sadeghi et al., 1967**). De la partie nord de l'Amérique du Sud jusqu'à la Colombie-Britannique, à l'ouest de l'Amérique du Nord et à l'est jusqu'à l'Illinois ; *A. microphylla*, l'ouest et le nord de l'Amérique du Sud jusqu'au sud de l'Amérique du Nord et les antilles.

La section *Rhizosperma* ne comprend que deux espèces, distribuées comme suit :

*A. pinnata*, présente en Afrique tropicale et australe, en Asie du Sud-Est, au Japon et en Australie ; et *A. nilotica*, que l'on retrouve en Afrique centrale, dans le Haut-Nil Soudan, l'Ouganda, la Tanzanie, le Congo et la Namibie (**Kannaiyan et Kumar, 2006**).



**Figure 7.** Distribution moderne approximative d'*Azolla* (**Small et Darbyshi, 2011**)

### Taxonomie

Les espèces d'*Azolla* sont divisées en deux sous-genres, *Euazolla* et *Rhizosperma*, en fonction des caractères des fructifications (**Sood et al. 2007**). D'autres auteurs utilisent le niveau de section taxonomique au lieu du sous-genre (**Saunders et Fowler, 1992**). Le sous-genre (section) *Azolla* compte cinq espèces, à savoir : *A. caroliniana* Willd., *A. filiculoides* Lam., *A. mexicana* Presl., *A. microphylla* Kaulf et *A. rubra* R.Br., tandis que la section *Rhizosperma* ne compte que deux espèces, *A. nilotica* et *A. pinnata* (**Raja et al., 2012**).

La position systématique d'*Azolla* sp se présente comme suit (**Diomande et al., 2017**)

- L'embranchement des : Ptéridophytes
- Classe des : Filicophytes
- L'ordre : Salviniales
- Famille : Azollacées

- Ordre : Hydropteridales.
- Genre : Azolla Lam
- Espèce : Azolla spp.

### 2.3. Description morphologique

La plante azolla est constituée d'un rhizome principal et de rhizomes de deuxième, troisième et parfois quatrième ordre, tous recouverts de feuilles alternes étroitement imbriquées (figure 8). Les rhizomes, qui flottent à la surface de l'eau, possèdent également des racines adventives à intervalles plus ou moins réguliers, immergées dans l'eau. Chaque feuille est composée d'un lobe supérieur (visible sur la photo), chlorophyllien, et d'un lobe inférieur, non chlorophyllien, en forme de bateau, qui assure la flottabilité de la plante. Le lobe supérieur contient une large cavité centrale résultant d'une dépression adaxiale de l'épiderme foliaire, abritant une population de cyanobactéries filamenteuses diazotrophes, c'est-à-dire capables de réduire l'azote de l'air, appelées Anqbazna ezollez (**Van-Hove,1987**).



**Figure 8 : Azolla fougère (Originale, 2025)**

### 2.4. Physiologie

Azolla se distingue par sa grande productivité associée à sa faculté de fixer l'azote à des niveaux significatifs. Il a la capacité de réaliser la photosynthèse à des taux supérieurs à ceux de la majorité des plantes. Parce que les deux contiennent une diversité de pigments de récolte légère. Les partenaires ont des caractéristiques complémentaires et sont capables de détecter une vaste gamme de longueurs d'onde lumineuses (**Shi et Hall, 1988**).

Des études menées à l'Institut international de recherche sur le riz aux Philippines, selon lesquelles *Azolla* a la capacité de multiplier sa masse par deux en une période de 3 à 5 jours et peut se développer dans une solution sans azote, tout en étant capable d'accumuler entre 30 et 40 kg de N par hectare en l'espace de deux semaines.

Dans des conditions optimales de lumière et de température, ils ont pu obtenir des périodes de duplication de 2 jours ou moins pour *A. filiculoides*, *A. caroliniana*, *A. mexicana* et *A. pinnata*. La biomasse maximale a été enregistrée pour *Azolla spp.* Selon différentes études, la masse sèche d'*A. caroliniana* est de 3 190 kg/ha, tandis qu'elle varie de 640 à 2 170 kg/ha pour *A. pinnata*, de 830 à 1 100 kg/ha pour *A. mexicana* et de 1 700 à 5 200 kg/ha pour *A. filiculoides* (Watanabe, 1982).

### 2.5. Espèces d'Azolla

- *Azolla filiculoides*

Espèce commune dans de nombreux pays, également connue sous le nom d'Azolla flottante ou Fougère flottante, illustrée à la figure 9 Elle possède de petites feuilles vertes anguleuses et des racines qui pendent sous l'eau. Elle forme souvent des colonies compactes (Triest et al., 2013).



Figure 9. *Azolla filiculoides* (Triest et al., 2013).

- *Azolla pinnata*

Cette espèce, également connue sous le nom d'Azolla pennée, se caractérise par des feuilles segmentées vert clair. On la trouve en Asie et en Afrique, dans les régions tropicales et subtropicales (Triest et al., 2013).



Figure 10 : *Azolla pinnata* (Triest et al., 2013).

- *Azolla caroliniana*

Cette espèce, originaire des Amériques, est communément appelée azolla de Caroline (figure 11). Ses feuilles vertes, légèrement dentelées, sont disposées en rosettes denses. Elle est souvent utilisée comme engrais organique dans les rizières (Lumpkin et al., 1980).



Figure 11 : *Azolla caroliniana* (Lumpkin et al., 1980).

- *Azolla mexicana*

Également connue sous le nom d'Azolla mexicaine (figure 12), elle possède des feuilles vert clair et des racines très fines. Elle est commune en eau douce et souvent utilisée dans les systèmes de traitement des eaux usées (Johansson et al., 2006).



Figure 12 : *Azolla mexicana*

- *Azolla microphylla*

*Azolla microphylla* est une fougère aquatique flottante, principalement retrouvée dans les zones tropicales et subtropicales. Elle présente des feuilles petites, imbriquées, de couleur vert foncé à rougeâtre, et pousse en tapis denses à la surface de l'eau (Watanabe et Liu, 1992)



Figure 13 : *Azolla microphylla* (Watanabe et Liu, 1992)

### 2.6. Reproduction d'azolla

Chez *Azolla pinnata*, il existe deux modes de reproduction : la reproduction sexuée ou générative et la reproduction asexuée ou végétative. La reproduction se produit végétativement dans des conditions climatiques favorables et générative ment pendant les saisons défavorables caractérisées par une chaleur ou un froid intense (**Becking, 1979**). Dans la reproduction sexuée, une nouvelle génération naît d'un embryon fécondé. Bien qu'un cycle biologique saprophyte ait été décrit, les conditions de formation des spores et leur importance écologique sont peu connues. Des températures élevées (début d'été) dans les zones tempérées et des températures basses dans les régions tropicales et subtropicales (*A. pinnata*) ont été rapportées comme induisant la formation de spores.

Dans le sud de la Chine, certaines souches locales d'*Azolla pinnata* produisent des spores abondantes en juin et juillet, et dans une moindre mesure en septembre et octobre. Dans le nord du Vietnam, les spores se forment en mars et avril. La formation des organes reproducteurs semble liée à de fortes densités de population d'*Azolla*. La symbiose est maintenue tout au long du cycle sexuel. Les cellules d'*Anabaena*, en particulier les akinètes, sont enfermées dans des macrosporocarpes. Elles sont intégrées dans une cavité sous le chapeau du macrosporange. Après fécondation, l'œuf forme un zygote, qui se développe en sporophyte avec une algue associée (**Ntendele, 2007**).

### 2.7. Facteurs environnementaux affectant *Azolla*

Les caractéristiques abiotiques influençant la croissance de l'*Azolla* peuvent être divisées en deux catégories principales : la structure de l'habitat et les facteurs physico-chimiques. (**Sadeghi et al., 2012**) ont montré que, pour une croissance excessive de l'*Azolla* dans les zones humides, les variables structurelles de l'habitat sont plus importantes que les variables physico-chimiques. De plus, les facteurs biologiques peuvent également influencer la croissance de l'*Azolla*. Nous décrivons ci-dessous brièvement certains des facteurs structurels et physico-chimiques les plus importants pour répondre aux besoins de l'*Azolla* en laboratoire et sur le terrain.

#### 2.8.1. Eau

Comme il ressort de l'étymologie de l'*Azolla* dérivé d'une origine grecque, à savoir azo et oléo qui signifie (tué par la sécheresse). Cette fougère ne peut survivre sans eau. Lorsque

suffisamment d'eau est disponible, elle peut former une couche d'une hauteur d'environ (2 à 3 cm) qui nécessite moins d'espace par rapport aux autres plantes aquatiques (Liu et al, 2008). Il a été rapporté que la croissance optimale et la production de biomasse d'*Azolla* dans la zone humide pourraient avoir une relation étroite avec la profondeur de l'eau, car des très faibles profondeurs pourraient ralentir la croissance et donc réduire sa production de biomasse (Sadeghi et al., 2012).

### 2.7.1. Température

La température optimale pour la croissance d'*Azolla* se situe entre 20 et 30 °C. Certaines souches ont pu survivre temporairement à des températures de -5 et 45 °C. D'autres souches sont très affectées par une température inférieure à 10 °C, mais peuvent supporter des valeurs dépassant 35 °C, comme le cas de nombreux écotypes d'*Azolla Pinnata*. Cependant, des températures supérieures à 37 °C affecteront sérieusement la multiplication d'*Azolla* (Amroune, 2020).

### 2.7.2. pH

La réaction d'*Azolla* au pH est influencée par divers éléments comme la température, la luminosité, les nutriments (notamment l'azote et le phosphore) ainsi que la présence de sol et de fer. L'*Azolla* a généralement une préférence pour un environnement qui tend vers la neutralité ou dans une certaine dans un environnement acide. Le pH idéal pour la croissance se situe entre 4,5 et 7,5 (Patrick Van Damme et al., 2013).

### 2.7.3. Lumière

Expansion d'*Azolla* s'accélère à mesure que l'intensité de la lumière augmente, atteignant environ 50% cd ou 50 % de la luminosité naturelle maximale. Au-delà de ce seuil, le taux d'accroissement demeure stable ou décroît progressivement en raison d'interactions mal cernées avec d'autres facteurs écologiques. L'*Azolla* change de couleur pour un rouge brunâtre lorsqu'exposé à une intensité lumineuse élevée durant l'été, et redevient vert lorsque l'ombre revient. Selon Sebastian et al. (2021), *Azolla* prospère mieux sous une photopériode d'environ

20 eures.

#### 2.7.4. Besoin nutritionnel

Azolla nécessite des macroéléments tels que le P, K, Ca, Mg et Mn ainsi que des microéléments comme le Fe, Mo et Co. L'absence de ces éléments provoque une réduction des croissances. Cependant, la particularité la plus notable dans ce domaine nutritionnel est l'indépendance complète vis-à-vis de la source d'Azote. Azolla se développe idéalement sans la présence d'azote combiné (Amroune, 2020).

Selon Sebastian et al. (2021), le Molybdate et le Colbate stimulent la capacité d'Azolla à fixer l'azote. Parmi tous les éléments cruciaux, c'est souvent le phosphore qui freine la croissance d'Azolla. Un manque de phosphore (< 0,2 % de la matière sèche) entraîne une réduction de l'activité de la nitrogénase ainsi que de la concentration en azote de l'Azolla.

#### 2.8. Composition chimique de l'Azolla

La composition chimique des espèces d'Azolla varie selon les écotypes, les conditions écologiques et la phase de croissance. La teneur en MS est généralement faible, de l'ordre de 5 à 7 % (Tableau 3).

**Tableau 8.** Principaux minéraux de l'*Azolla spp* (Feedipedia, 2019)

Les minéraux	Unité	Moyenne	Min	Max
Calcium	g/Kg MS	5.8	1.0	17.0
Phosphore	g/Kg MS	6.1	0.3	15.5
potqssium	g/Kg MS	17.4	10.9	22.5
Sodium	g/Kg MS	9.0	2.8	12.5
maganesium	g/Kg MS	5	3.9	6.1
Mangaese	g/Kg MS	762	208	1429
Cuivre	g/Kg MS	16	10	28
Fer	g/Kg MS	36900	711	8200
Zinc	g/Kg MS	38	11	77

#### 2.9. Utilisation en agriculture

Selon Rahajarison (2005), l'Azolla est utilisée comme engrais.

- Sa capacité de fixer l'azote, contribue également au maintien de la fertilité du sol en fournissant un humus riche en nutriments grâce à sa décomposition

- Réducteur des pertes d'ammoniac par volatilisation dans les rizières. Un certain nombre d'avantages secondaires a été attribué à l'Azolla
- Diminution des pertes d'eau par évaporation
- Effet herbicide dû au tapis d'Azolla qui empêche les plantules de mauvaises herbes de croître.
- Réduction de la prolifération des moustiques. Ces applications ne sont pas seules possibles. En effet, des recherches sont entreprises en vue d'évaluer le potentiel d'utilisation d'Azolla comme **(FAO, 1987)**.
- Engrais vert pour des cultures sur terre ferme après compostage
- Aliment pour les animaux (volaille, lapins, ruminants ...)
- Matière première pour digesteur biométhane

## **2<sup>ème</sup> Partie : Étude expérimentale**



**3. Matériels et Méthode**

**3.1. Matériel végétal**

L'expérimentation a été menée sur deux variétés de tomate (Heinz et Sereen). Les plants ont été mis en terre le 25 février 2025, et la période de croissance s'est poursuivie Jusqu'au. 30 juin 2025 date à laquelle la récolte a été effectuée.

**Tableau 9.** Caractéristiques du matériel végétal utilisé

Caractéristiques	Variété 1	Variété 2
Nom	KSI -ROSA	Sereen F1
Type	Hybride F1	Hybride F1
Forme du fruit	Ovale	Ronde
Couleur du fruit	Rouge foncé	Rouge vif
Pureté	99	99.98 %
Germination	85	90%
Résistance maladies	La fusariose et le mildiou	Verticillium, Fusarium, TMV



**Semence de la variété Ksi-Rosa**



**Semence de la variété 2 (Sereen F1)**

### 3.2.Méthode d'étude

#### 3.2.1. Mise en place de la culture d'Azolla

##### 3.2.1.1. Construction des bassins

La première étape a consisté à choisir l'emplacement optimal, en tenant compte de facteurs tels que l'ombre, essentielle à la croissance de l'Azolla. Afin d'assurer un équilibre entre ombre et soleil (50 % d'ombre et 50 % d'exposition), une barrière en tissu polyester a été installée. Cette structure offre des conditions idéales pour la croissance de l'Azolla, créant un environnement favorable à sa croissance.

L'étape suivante du protocole consistait à préparer un récipient. Il s'agissait de se procurer une bassine en plastique de 56 cm de large et 26cm de profondeur (voir figures 15) et de le remplir de terre.



**Figure 15** : Récipient rempli de terre (Originale, 2025).

Les bassins ont été remplis Une couche de 5 à 6 cm de terre agricole fertile a été ajoutée au fond du pot (10-15 kg). Mélangez la terre avec du fumier de vache ou du compost



**Figure 16 :** Bassin rempli d'eau (Originale, 2025).

### 3.2.1.2. Culture d'Azolla

La culture de l'Azolla est une étape cruciale de notre protocole expérimental. Pour bassin, nous avons mesuré environ 1 kg d'Azolla, comme illustrés à la figure 17 Cette quantité a été soigneusement calculée pour garantir une croissance optimale de l'Azolla tout en évitant une surpopulation qui pourrait nuire à son développement



**Figure 17 :** Azolla (Originale, 2025)

Une fois que nous avons déterminé la quantité de plantes Azolla, nous avons procédé à sa distribution uniforme sur la surface de l'eau de chaque étang, comme indiqué sur la figure 18. Cette distribution uniforme est essentielle pour garantir que chaque plante

Azolla dispose de suffisamment d'espace pour pousser et prospérer sans être gênée par d'autres plantes.



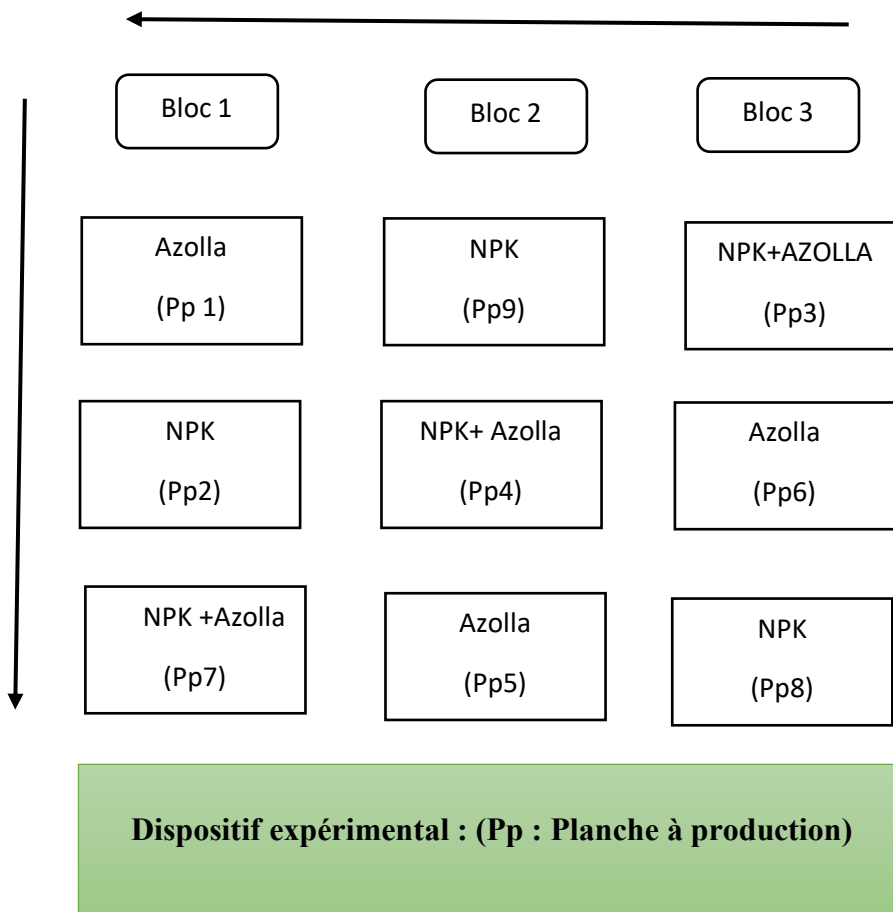
**Figure 18 :** Bassin après la culture d'Azolla (Originale, 2025)

- **Irrigation d'azolla**

L'irrigation régulière des étangs était assurée par l'eau d'un puits. Cette pratique est essentielle pour maintenir un niveau d'eau adéquat dans les étangs, indispensable à la croissance de l'Azolla.

### **3.2.2. Dispositif expérimental**

Le dispositif expérimental a été élaboré à partir de deux cultivars de tomates soumis à trois traitements distincts : T1, T2 et T3. Le traitement T1 a servi de témoin positif avec engrais NPK. Le traitement T2 a été appliqué avec de l'Azolla sèche et moulue, et le traitement T3 avec de l'Azolla +NPK. Trois pots ont été utilisés pour le traitement à l'Azolla sèche, trois pots pour l'Azolla + NPK et trois pots pour le contrôle positif utilisant l'engrais NPK. Ce dispositif a permis d'évaluer l'effet de l'Azolla sur la croissance des plants de tomates, en les comparant à des témoins positifs.



### 3.2.3. Supports de culture

Des pots en plastique avec un diamètre de 35cm, une base de 14 cm et une hauteur de 60 cm ont été utilisés pour la culture.

#### ➤ Sol

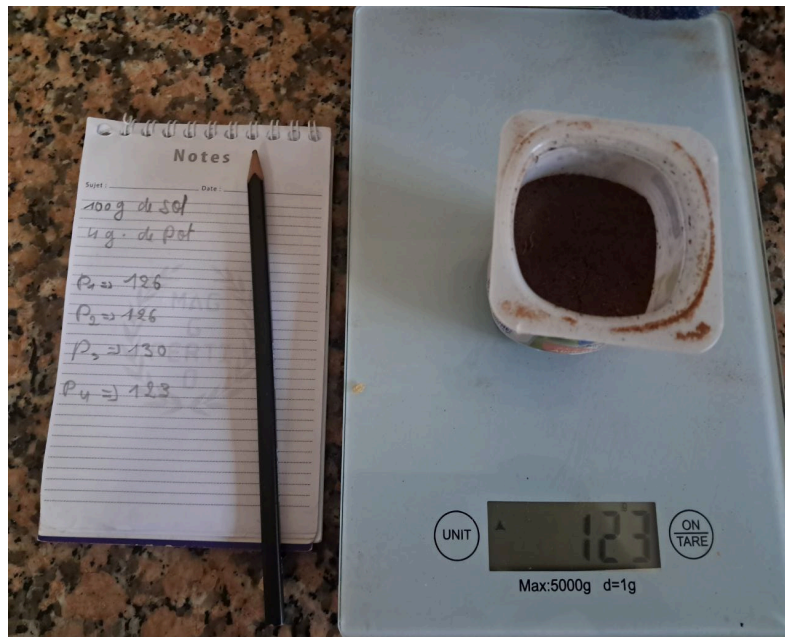
La terre utilisée provient de la station expérimentale de mazargan et présente une texture sableuse légère et lumineuse.

#### ➤ Hcc

L'abréviation Hcc signifie Humidité à la capacité au champ. C'est la quantité maximale d'eau que peut contenir un sol dans sa porosité après que l'excès d'eau a percolé, c'est-à-dire après drainage par gravité.

Pour déterminer la teneur en eau d'un sol, un protocole classique consiste à :

- ✓ Prélever un échantillon de sol
- ✓ Peser 100 g de terre sèche (4 d'échantillon)
- ✓ Ajoute l'eau et attende 24 h
- ✓ Peser cet échantillon humide



**Figure 19 :** Préparation des échantillons pour le calcul de la capacité au champ (Originale, 2025)

- ✓ Calcul la moyenne du quatre échantions
- ✓ Calcul de la la teneur en eau  $teneur\ en\ eau = \frac{P_f - P_s}{P_f} \times 100$



**Figure 20 :** Échantillons de terre de culture (Originale, 2025)

- ✓ Calcule la moyenne du quatre échantions
  - $\bar{x} = \frac{126+126+130+123}{4} = 126,25$
- ✓ Calculer la teneur en eau (TE) à la capacité au champ a été calculée selon la formule suivante :

$$TE = \frac{Pf-Ps}{Pf} \times 100$$

$$TE = \frac{126,25-100}{126,25} \times 100$$

$$TE = 20,79$$

**Pour un pot de 5000 g de substrat, la dose d'irrigation est :**

➤ **Capacité au champ (Hcc)**

L'abréviation Hcc signifie Humidité à la Capacité au Champ. C'est la quantité maximale d'eau que peut contenir un sol dans sa porosité après que l'excès d'eau a percolé, c'est-à-dire après drainage par gravité.

$$Hcc = TE \times 50 \rightarrow Hcc = 20,79 \times 50 = 1039.5g$$

➤ La dose d'irrigation (pour le témoin) est calculée d'une manière suivante

- 30 % (Durant le stade développement végétatif)  $\rightarrow \frac{20,79 \times 30}{100} = 6.237ml$

Pour 100 g de sol pour un pot de 5000g la dose d'irrigation est :  $6.237 \times 50 = 311.85$

- Le début de la floraison on augmente la dose à 60% de la Hcc =  $\frac{20.79 \times 60}{100} = 12.474ml$  pour pot 100 g de sol et pour pot de 5000g la dose d'irrigation est  $12.474 ml \times 50 = 623.7 ml$ .

### 3.2.4. Mise en place de la culture

- **Étape 1** : Remplissage des alvéoles avec le substrat (terreau) pour les deux variétés

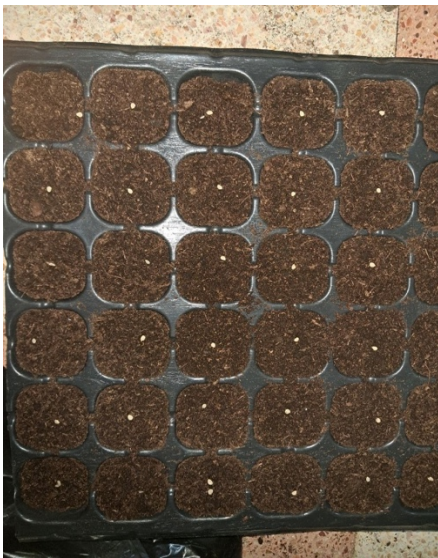


**Figure 21** : Plateaux remplis prêt pour l'expérience (Originale, 2025)



**Figure 22** : Terreau utilisé pour l'expérimentation (Originale, 2025)

**Étape 2** : Semis des graines en les enfonçant au milieu de chaque alvéole à profondeur de 2mm. On peut également tracer une légère empreinte digitale des trous ayant une profondeur de 2 mm d'un crayon ensuite, on y dépose les graines.



**Figure 23** : Semis de graine de tomate (Originale, 2025)

**Étape 3** : Recouvrir avec du terreau en surface sans trop tasser afin que la graine demeure légèrement enterrée.

**Étape 4** : Arroser à l'aide d'un vaporisateur afin d'humidifier le terreau.

**Étape 5 :** Couvrez les plateaux de semis d'un film plastique noir pour conserver l'humidité, essentielle à la germination des graines sans avoir à arroser à nouveau. Le paillis est retiré dès l'apparition des premières feuilles pour éviter que le film noir ne brûle les jeunes plants.



**Figure 24 :** Paillage après le semis.

- **Arrosages après le semis**

Des arrosages ont été effectués, selon l'état d'humidité du substrat, généralement (02 à 03 selon les besoins) deux fois par semaine.



**Figure 25 :** Apparition des premiers cotylédons (Originale, 2025)

### **3.3.Préparation de la poudre d'azolla**

- **Séchage**

Après la récolte de l'Azolla, une étape cruciale de séchage a été réalisée pour garantir sa qualité et prolonger sa durée de conservation. Nous avons opté pour une méthode naturelle

de séchage à l'air libre, en prenant soin de protéger l'Azolla de la lumière directe du soleil afin d'éviter la dégradation de ses nutriments.

L'Azolla a été soigneusement étalée sur une bâche, créant ainsi une surface plane et bien aérée pour une évaporation efficace de l'humidité. Pendant 3 à 4 jours, le processus de séchage a été régulièrement surveillé afin de garantir que l'Azolla perde son excès d'eau tout en conservant ses nutriments essentiels. Si la technique de séchage à l'air libre est simple et couramment utilisée pour préserver les propriétés nutritionnelles de l'Azolla, elle nécessite une attention particulière pour éviter une exposition excessive aux agents atmosphériques qui pourraient altérer sa qualité.



**Figure 26 :** Azolla sèche (Originale, 2025)

- **Broyage**

Pour évaluer l'efficacité de l'Azolla en tant qu'amendement de sol, nous avons broyé l'Azolla séchée en une poudre fine. Cette opération a permis de transformer le matériau en une forme plus facilement incorporable dans le sol. Le broyage a facilité une meilleure dispersion des nutriments contenus dans l'Azolla, optimisant ainsi son intégration dans le substrat. En réduisant l'Azolla en poudre, nous avons également amélioré son absorption par les plants de tomate, permettant une évaluation plus précise de ses effets sur la croissance des cultures. Cette méthode a contribué à une meilleure compréhension de la manière dont l'Azolla séchée influence la fertilité du sol et la productivité des plantes.



**Figure 27** : Azolla poudre (Originale, 2025).

**Tableau 10.** Traitements de l'azolla poudre chaque plante

Traitements	Quantité d'Azolla en poudre (g)	Procédure d'application
<b>T1</b>	<b>5g+</b> irrigation	Appliquer au niveau du collet de la plante, puis couvrir avec du sol
<b>T2</b>	<b>10g+</b> irrigation	Appliquer au niveau du collet de la plante, puis couvrir avec du sol
<b>T3</b>	<b>20 g +</b> irrigation	Appliquer au niveau du collet de la plante, puis couvrir avec du sol

- **Témoin positif (NPK)**

La préparation du traitement NPK (20-20-20) est cruciale pour assurer une croissance optimale des plantes. Le NPK est un engrais contenant ces trois nutriments essentiels, chacun ayant un rôle spécifique dans le développement des végétaux :

1. **Azote (N)** : Il est fondamental pour la croissance rapide et vigoureuse des feuilles et des tiges.
2. **Phosphore (P)** : Il est essentiel pour le développement d'un système racinaire solide, la floraison, la production de fruits et graines.
3. **Potassium (K)** : Il régule les fonctions physiologiques des plantes, favorise une croissance équilibrée, renforce la résistance aux maladies et au stress, et améliore la qualité des fruits

**Tableau 11.** Traitements NPK chaque plante

Traitements	Dilution	Composant	Procédure
T1	25%	2g	Au niveau du col de plant et bien, couvre
T2	50%	4g	Au niveau du col de plant et bien, couvre
T3	75%	8 g	Au niveau du col de plant et bien, couvre

- **Azolla + NPK**

L'ensemble Azolla + NPK désigne l'utilisation combinée d'Azolla (comme biofertilisant naturel) avec des engrais chimiques NPK à doses réduites

**Tableau 12 :** traitements NPK+ Azolla chaque plante

Traitements	NPK	Azolla	Procédure
T1	1g	2.5g	Au niveau du col de plant et bien, couvre
T2	2g	5g	Au niveau du col de plant et bien, couvre
T3	4g	10g	Au niveau du col de plant et bien, couvre

### 3.3.Paramètres mesurés

Les paramètres ont été mesurés pour chaque traitement dans les pots témoins et traitées (azolla et azolla +NPK) à a été fait aléatoirement (Figure 15) afin d'étudier la réponse stimulatrice des plants tomate au biofertilisant testé.



**Figure 28 :** Opération de mesure de la longueur de la tige pour les deux variétés de tomate

Des mesures quantitatives sur la longueur et les nombres des talles des plants ont été réalisées à l'aide d'un mètre à ruban et une règle. Aussi, d'autres paramètres ont été pris en considération la date de floraison, la date de nouaison, le nombre de fleurs par bouquet, le nombre de fruits formés et la date de récolte.

Après la récolte, le nombre de fruits récoltés, le calibre et le poids de fruits, et enfin, le rendement de la récolté calibre ont été déterminé.

#### **4. Analyse statistique**

Les résultats obtenus ont été traité avec l'Excel 7 pour l'analyse de la variance à deux facteurs (variétés\*traitements).

## Discussion

La présente étude a examiné les effets de l'utilisation de l'Azolla (en poudre) et Azolla + NPK sur plusieurs paramètres de croissance de deux variétés de tomate (Ksi-Rosa et Sreen F1), tels que la longueur de la tige, le nombre de fleurs par plant, le nombre des fruits par plant, le poids moyen de fruits et le rendement par plant. Ces résultats s'alignent et enrichissent les travaux existants sur l'amélioration de la productivité de la tomate nécessite une gestion optimale de la fertilisation.

L'application d'Azolla a montré une efficacité notable dans l'amélioration des performances de la tomate, traduite par une meilleure croissance végétative et une augmentation du rendement. Cette croissance s'explique par la forte concentration d'azote et de phosphore présente dans l'Azolla. Comme ont expliqué Brassat et al. (2005) sur les composants essentiels de l'Azolla favorisant directement la croissance et le développement des végétaux, et en stimulant notamment le développement du feuillage et en améliorant la productivité des cultures.

L'apport d'Azolla au sol l'enrichit en éléments nutritifs secondaires et oligo-éléments, ce qui favorise une nutrition équilibrée de la plante. Toutefois, son action est relativement lente et progressive, car elle dépend de la décomposition et de la minéralisation par la microflore du sol (**Lumpkin, Plucknett 1980**). En effet l'azolla abrite une cyanobactérie du genre *Anabaena* qui a la propriété de fixer l'azote, c'est-à-dire de transformer l'azote moléculaire de l'atmosphère en azote assimilable par la plante (**Raja w. et al ,2012**). L'azote est un des principaux facteurs de la croissance des plantes (**FAO, 1980**).

Le potentiel de l'Azolla comme biofertilisant de fixer l'azote, dans notre travail, le traitement (NPK ajouté d'Azolla) a amélioré la croissance en obtenant une longueur de tige plus importante que le NPK seul pour les deux variétés. Aussi, Azolla seule a permis d'obtenir les tiges plus longues, surpassant le NPK seul, ces résultats sont confirmés par (**Raja, W., Rathaur, P., John, S. A., Ramteke, P. W., 2012**) qui ont estimé qu'Azolla enrichit le sol en matière organique et libère progressivement des nutriments.

L'association de l'Azolla avec le NPK représente une stratégie de fertilisation intéressante, car elle combine les avantages d'un engrais minéral à action rapide et d'un biofertilisant organique durable. Les résultats ont montré que, d'une manière générale, l'ajout d'Azolla avec NPK permet d'améliorer la croissance et la productivité de la tomate par rapport à l'utilisation du NPK seul. Selon (**Ojetayo et al., 2011**) Azolla fournit de l'azote organique grâce à la fixation symbiotique d'*Anabaena azollae*, enrichissant ainsi le sol en

matière organique, permettant aux plantes cultivées d'absorber de manière optimale les nutriments progressivement libérés dans le sol.

Alors que NPK assure la disponibilité immédiate des éléments minéraux essentiels (azote, phosphore et potassium). L'association des deux composés renforce ainsi l'effet complémentaire : l'action rapide du NPK et l'effet durable de l'azolla. Cependant, les résultats ont indiqué que cette combinaison a produit une synergie optimale. D'autres travaux ont précisé que dans certains cas, l'azolla seule est plus efficace que le mélange, ce qui peut s'expliquer par une saturation en azote ou un déséquilibre nutritionnel lorsque les deux sources sont appliquées simultanément (**Swami, Singh, 2020**). Cependant, dans d'autres cas, le mélange s'avère très bénéfique, notamment pour le poids des fruits, confirmant son potentiel d'amélioration de la qualité et du rendement agricole (**Seleiman et al., 2022**).

Le traitement à base de NPK a donné des résultats qui peuvent être expliqués par la libération rapide des éléments fertilisants tels que l'azote, le phosphore et le potassium. Ce type d'engrais minéral est couramment utilisé pour corriger rapidement les carences nutritionnelles du sol. Toutefois, cette libération rapide peut entraîner une migration des minéraux vers les horizons profonds du sol, rendant ces nutriments inaccessibles aux racines des plantes. Pour pallier ce problème, il est essentiel d'ajouter des matières organiques, qui agissent comme un complément durable. En effet, la matière organique est considérée comme le meilleur fertilisant de base, offrant une solution à la fois efficace et respectueuse des mécanismes naturels du sol (**Giller et al., 2002**).

Dans l'ensemble, l'Azolla apparaît comme un biofertilisant prometteur, capable d'améliorer la croissance végétative (tige) et la productivité (nombre et poids de fruits), mais son efficacité varie selon le caractère étudié et selon la variété. La variété Ksi-Rosa n'a pas réagi favorablement à l'Azolla seule. Cependant, la variété Sreen F1 a bien réagi à la combinaison NPK+Azolla en donnant les meilleurs résultats.

Ces résultats ont confirmé qu'Azolla peut être utilisée comme un complément au NPK. Les résultats de cette expérience ont été appuyés par des travaux sur l'utilisation d'Azolla comme biofertilisant menés par **Thapa et Poudel (2021)**, **Yao et al. (2018)**, **Prabakaran et al. (2022)**, **Hanafy et El-Emary (2018)**, et **Handajani (2011)**, qui ont mis en lumière son potentiel en tant que biofertilisant, ainsi que ses avantages dans la régénération des sols et la diminution des besoins en nutriments minéraux.

## **Conclusion**

---

### **Conclusion**

L'étude réalisée sur l'effet de l'Azolla, seule ou en combinaison avec le NPK, sur deux variétés de tomate (Ksi-Rosa et Sereen F1) a montré que l'Azolla constitue un biofertilisant efficace capable d'améliorer la croissance et la productivité des plantes. Dans l'ensemble, les résultats révèlent que l'association Azolla + NPK représente la meilleure stratégie, en combinant l'action rapide des engrais minéraux et l'effet durable du biofertilisant organique. Cette combinaison a permis d'optimiser la longueur des tiges, le nombre de fleurs, le poids moyen des fruits ainsi que le rendement global par plant, en particulier chez la variété Sereen F1.

L'utilisation de l'Azolla seule a également donné des résultats intéressants, notamment pour la croissance végétative, mais son efficacité reste variable selon les paramètres étudiés et la variété considérée. Ces observations confirment que l'intégration de l'Azolla dans les pratiques de fertilisation constitue une alternative durable et écologique, permettant de réduire la dépendance aux engrais chimiques tout en améliorant la qualité et le rendement de la tomate.

En perspective, l'adoption de cette stratégie de fertilisation pourrait contribuer à une agriculture plus respectueuse de l'environnement et économiquement avantageuse, tout en ouvrant la voie à des recherches complémentaires visant à optimiser les doses et les modes d'application de l'Azolla en fonction des conditions pédoclimatiques et des variétés cultivées.

## Références bibliographiques

---

- Amroune N.** 2020. *Alimentation du lapin : valorisation de l'Azolla dans l'alimentation des lapins, étude bibliographique*. Mémoire de Master, 40 p.
- ATHERTON J. G. et RUDICH J.** 1986 - *The tomato crop: a scientific basis for improvement*, 661 p.
- Becking J.H.** 1979. *Environmental requirements of Azolla for use in tropical rice production*. Nitrogen and Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, 345-374.
- Bentvelsen C.L.M.** 1980. *Réponse des rendements à l'eau*. Ed. Dunod. 235 p.
- Biswas, M., Parveen, S., Shimozawa, H. et Nakagoshi, N.** (2005). *Effects of Azolla species on weed emergence in a rice paddy ecosystem*. Weed Biology Management, 5, 176-183.
- Brasset, C. et al. (2005)**. *Composants essentiels de l'Azolla et rôle fertilisant*.
- Carrapiço, F., Teixeira, G. et Diniz, M.A.** (2000). *Azolla as Biofertiliser in Africa. A Challenge for the Future*. Revista de Ciências Agrárias, 23, 120-138.
- Charles VAN HOVE.** 1987. *Aquaculture et Développement*. vol.7, Cahiers d'Ethologie Appliquée. Université Catholique de Louvain, p. 33.
- Chaux C.L. et Foury C.L.** 1994. *Cultures légumières et maraîchères. Tome III : légumineuses potagères, légumes fruit*. TEC et Doc Lavoisier, Paris. 563 p.
- Chougar S.** 2011. *Bioécologie de la mineuse de la tomate Tuta absoluta...* Mémoire de magistère, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou. 98 p.
- CNABio.** 2013. *Norme Burkinabé en agriculture biologique*. 42 p.
- Diomande M., Grogga N. & Kouame K.B.** (2017). *Effet des filtrats de fiente de poulet et boue de vache...* International Journal of Scientific & Engineering Research.
- Dommergues Y.R., Diem H.G.** 1982. *Microbiology of Tropical Soils and Plant Productivity*. Dev. Plant and Soil Science, 5, 329 p.
- EL AKEL M., CHOUIBANI M. et KAACK H.** 2001. *Protection intégrée en culture de tomate*. Integrated Pest Management Review, 1, 15-29.
- FAO,** 1980.- les engrais et leur application. FAO, Rome, Italie, 51 p.

- FAO.** 1987. *Guide sur les engrais et la nutrition des plantes*. Service des engrais et de la nutrition azotée, Rome, 190 p.
- FAO.** 1988. *Culture protégées en climat méditerranéen*. FAO Production végétale et protection des plantes. 318 p.
- Feedipedia.** 2019. *Animal Feed Resources Information System - INRAE CIRAD AFZ and FAO*.
- Francou, C.** 2004. *Stabilisation de la matière organique au cours du compostage...* Thèse, INA Paris-Grignon.
- GALLAIS A., et BANNEROT H.** 1992. *Amélioration des espèces végétales cultivées*. Ed. INRA, Paris. 382 p.
- Gérald H., Christiane S., et Environnement-Innovation S.** 2011b. *La fertilité des sols : L'importance de la matière organique*. 46 p.
- Giller K. E., Cadisch G. & Palm C.,** 2002.- The North South divide : Organic wastes or resources of nutrient management. *Agronomy* 22: 703-709.
- Heuvelink, E. (2005).** *Tomatoes*. CABI Publishing.
- HUAT J.** 2008. *Diagnostic sur la variabilité des modes de conduite d'une culture...* Thèse, AgroParisTech., 264 p.
- IFV.** 2010. *Fertilisation de la vigne : La réglementation*. Fiche technique, 7 p.
- Ikrina M.A., Kolbin A.M.** 2004. *Regulators of Plant Growth and Development, Vol.1, Stimulants*. Moscow: Chimia.
- Johansson M., Lantto R.** 2006. *Efficiency of phosphorus removal from wastewater using the water fern Azolla*. Water Research.
- Kannaiyan, S. & Kumar, K.** 2006. *Biodiversity of Azolla and its algal symbiont, Anabaena azollae*. NBA Scientific Bulletin No.2. Chennai, India.
- Kinet B.** 1985. *Contrôle du développement de l'inflorescence de la tomate...* Rev. Hort., n°200, 30-36.
- Lumpkin T.A. & Plucknett D.L.** 1980. *Azolla: Botany, physiology, and use as a green manure*. Economic Botany, 34(2), 111-153.
- Lumpkin T.A., Plucknett D.L.** 1982. *Azolla as a green manure: use and management in crop production*. Westview Press, Boulder, 230 p.
- Machi S. et al.** 2006. *Biofertilizer Manual*. Forum for Nuclear Cooperation in Asia, Japan Atomic Industrial Forum. 3 p.
- Martin H.** 2019. *Cultivation of tomato production, processing and marketing*.
- Merzoug et Kada.** 2021. *Isolement et caractérisation des souches de Rhizobium...* Thèse PhD.

**Mouhouche B.** 1983. *Essai des rationnements de l'eau sur tomate...* Thèse de Magistère, INA Alger. 170 p.

**Muraleedharan H.** 2010. *Booklet on biofertilizer (phosphobacteria)*. Murugrappa Chettiar Research Center, India. 7 p.

**Naika S., De Jeud J.V.L., De Jeffau M., Hilmi M., Vandam B.** 2005. *La culture de tomate, production, transformation et commercialisation*. Wageningen, 105 p.

**Ojetayo A.E., Olaniyi J.O., Akanbi W.B. & Olabiyi T.I.**, 2011.- Effect of fertilizer types on nutritional quality of two cabbage varieties before and after storage. *Journal of Applied Biosciences* 48: 3322– 3330.

**Patrick Van Damme, Rahmat Zarkami, Karim Sabetraftar.** 2013. *Use of support vector machines (SVMs) to predict distribution of Azolla filiculoides*. *Ecological Modelling*, 244, 117–126.

**Polese J.M.** 2007. *La culture de la tomate*. Ed. Artémis. 95 p.

**Rajesh S.** 2020. *Production of Azolla as livestock feed supplement in India*. Pashudhan Praharee.

**Raja, W., Rathaur, P., John, S.A. & Ramteke, P.W.** 2012. *Azolla-anabaena association and its significance in supportable agriculture*. *Hacettepe J. Biol. Chem.*, 40, 1-6.

**Rahagarison.** 2005. *Étude bibliographique de l'Azolla ou "ramilamina"*. TALOHA, n°14-15.

**Rasoloarivony R.** 2003. *Contribution à l'étude de l'influence des conditions climatiques sur la sporulation d'Azolla*. Thèse doctorat. 173 p.

**Rekibi Fouzi.** 2014-2015. *Analyse compétitive de la filière tomate sous serre*. Thèse de Magistère, Univ. Biskra. 7 p.

**Renaud V.** 2006. *Les tomates qui ont du goût*. Ed. Ulmer, Paris.

**Reynuad P.A., Franche C.** 1986. *Azolla Pinnata var. Pinnata*. ORSTOM, Dakar. 15 p.

**Rice-Evans C., Miller N., Paganga G.** 1997. *Antioxidant properties of phenolic compounds*. *Trends in Plant Science*, 2(4), 152-159.

**Ros M., Raut I., Santissima-Trinidad A. B., Pascual J. A.** 2017. *Relationship of microbial communities and suppressiveness...* *PLOS ONE*, 12(3), e0174069.

**Sadeghi R., Zarkami R., Sabetraftar K., Van Damme P.** 2012a. *Use of SVMs to predict distribution of Azolla filiculoides...* *Ecological Modelling*, 244, 117–126.

## Références bibliographiques

---

- Saunders R.M.K., Fowler K.** 1992. *A morphological taxonomic revision of Azolla Lam. sect. Rhizosperma*. Bot. J. Linnean Society, 109, 329-357.
- Seleiman, M.F., Abdelaal, A., et al. (2022).** *Azolla Compost as an Approach for Enhancing Growth, Productivity and Nutrient Uptake of Oryza sativa L.* Agronomy, 12(2), 416.
- Shafawati S.N., Siddiquee S.** 2013. *Composting of oil palm fibres and Trichoderma spp. as biological control agent*. Int. Biodeterioration & Biodegradation, 85, 243-253.
- Shankara, Naika., Joep Van., Lidt de Jeude., Marja de Goffau., Martin, Hilmi., Barbara Van Dam.** 2005. *La culture de la tomate : production, transformation et commercialisation*.
- Shi D.J., Hall D.O.** 1988. *The Azolla-Anabaena association: Historical perspective, symbiosis and energy metabolism*. Botanical Review, 54, 353-386.
- Sood A., Prasanna R., Singh P.K.** 2007. *Utilization of SDS-PAGE for characterization of Azolla species*. Ann. Bot. Fennici, 44, 283-286.
- Swami, S., & Singh, S. (2020).** Effect of nitrogen application through urea and Azolla on yield, Journal of Environmental Biology, 41(1), 139–146.
- Thapa, P., & Poudel, R. (2021).** *Use of Azolla in tomato cultivation*.
- Torre L.A., Battaglia V., Caradonia F.** 2016. *Plant biostimulant legislations in European Member States*. J. Sci. Food Agric., 96, 727–734.
- Triest L., Stiers I.** 2013. *Azolla pinnata as a biofertilizer for wetland rice*. Int. J. Environ. Studies, 70(6), 962-971.
- Wagner G.M.** 1997. *Azolla : à review of its biology and utilization*. Botanical Review, 63, 1-26.
- Watanabe I.** 1982. *Azolla-Anabaena symbiosis: Its physiology and use in tropical agriculture*. In : Dommergues & Diem (eds.), *Microbiology of tropical soils*, Martinus Nijhoff, The Hague.
- Yao, W. et al. (2018).** *Effects of Azolla as biofertilizer on crop yield and soil fertility*.
- Zuang H.** 1982. *La fertilisation des cultures légumières*. CTIFL, Paris. 396 p.