

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences Biologique



Mémoire de Master Académique

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Ecologique

Spécialité : Ecologie Végétale et Environnement

THEME

**Optimisation écologique de la production de la tomate sous
serre grâce à un système de chauffage solaire**

Présenté par :

Melle. Sellami Douaa

Soutenu publiquement :

Le 23 /06/2025

Devant le jury :

M^{lle} HANNANI A.	Présidente	MCB	UKM Ouargla
M. EDDOUD A.	Examineur	MAA	UKM Ouargla
M. AZIB S.	Encadrant	MCA	UKM Ouargla
M. ZIANI L.	Co-encadrant	MCA	UKM Ouargla

Année Universitaire : 2024/2025

Remerciements

"بما انتهى در بول ختم جهد ول ت م سع ي ال بفضلك يا رب، فالحمد لل حمدًا كثيرًا طيبًا مباركًا فيه"

Je remercie tout d'abord mon encadrant Dr. AZIB Salim pour sa suggestion et sa supervision de la réalisation de ce mémoire, pour ses conseils et son orientation, ainsi que pour sa présence et son soutien constant à mon égard, avec une grande appréciation et gratitude.

Mes remerciements vont également au Dr. Ziani Lotfi, Maître de conférences A au département de génie mécanique de l'Université Kasdi Merbah Ouargla, pour son précieux co-encadrement et ses conseils éclairés tout au long de ce travail.

Je tiens également à exprimer mes remerciements et mon respect au Dr. Hannani Amina (MCB à l'Université de Kasdi-Merbah Ouargla) pour m'avoir accordé l'honneur de présider le comité de discussion de cette thèse.

À l'honorable professeur Eddoud Amar (l'Université de Kasdi-Merbah Ouargla), je suis très reconnaissant(e) pour son approbation afin de discuter et évaluer ce mémoire.

J'adresse également mes sincères remerciements à tout le personnel de la Faculté des Sciences Naturelles et de la Vie de l'Université de Kasdi-Merbah à Ouargla en général et au personnel spécialisé en sciences écologiques en particulier, chacun en son nom.

À mes estimés professeurs, que j'ai eu l'honneur d'étudier sous leur patronage, tous les sens de la gratitude ne leur rendent pas justice. Merci pour votre patience et votre dévouement.

Enfin, merci à ma famille et à mes amis, chacun nommément, pour leurs conseils et leur soutien moral. Puissiez-vous toujours être le meilleur soutien.

Dédicaces

الحمد لل على ما مضى، وعلى ما هو آتٍ، وعلى ما هو قائم... الحمد لل دائماً وأبداً، فإن لم أشكر الله أول، فلن أوجه شكري؟ وإن كانت سفن العمر ل تبحر إل ببحر الجزاء، فإن أصدق ما يُقال في مقام العرفان: "إنما تُهدى الكلمات لمن يستحقها". لذلك، أكتب هذه السطور لكم جميعاً، ل لأجل شخص بعينه، بل لأن ك الّ منكم يستحق أن تُهدى إليه أصدق الكلمات وأجمل الدعوات. صدقت كلمات الشاعر حين قال: "لقد نزلت من الفؤاد بمنزلة ما كان غيرك فيه للأمانة منزل".

إلى من كان سندي الذي ل يلين، وصوته الحنون ل يغيب، وابتهامته تضيء حياتي... إلى والدي العزيز، يا أعلى الناس، شكراً لك على كل شيء: على عطائك، وصبرك، ودعائك الذي رافقني في كل مراحل الطريق.

وإلى من كانت الدفء في برد الأيام، والمذا في ضيق اللحظات، والدعاء الذي ل ينقطع... إلى أمي الغالية، جنّتي في الدنيا، أعترف أن كلماتي تقف عاجزة أمام عظمة قلبك، فأسال الله أن يحفظك، ويبارك في عمرك، ويرضى عنك، ويقر عيني بك.

إلى إخوتي الأحبة، عبد الصمد، ياسر، إسراء، وقصي، من تقاسموا معي الضحكة والدمعة، وشدوا أزرني في كل الظروف، أنتم سندي الحقيقي ولكم في القلب مكان ل يمسّ ول يرام.

وإلى من كان لي بمقام الأب الثاني، إلى عمي العزيز أحمد، الذي لم يبخل يوماً بدعوه ونصائحه وتشجيعه، والذي كنت أستمد منه الإصرار والثبات، فلك مني كل المتنان على وقوفك بجاني بكل حب وصدق، وإلى زوجته الطيبة، التي كانت دائماً بسؤالها، وبدعائها، وبدفء حضورها، تبعث في قلبي السكينة... جزاكما الله عني كل خير، وبارك فيكما، كما باركنم وجودكما في حياتي.

ول يسعني إل أن أخص بالشكر أساتذتي الكرام، الذين كانت كلماتهم مشاعل هدى، وعلمهم زاداً لي في طريقي، فلكم مني كل الاحترام والتقدير، ودمتم منارات علم ونبل.

وإلى صديقتي الغالية، أختي الثانية شيماء، يا من كنتِ البلمس لروحي ورفيقة دربي، جزاكِ الله عني كل خير، فقد كنتِ النور حين أظلمت الطرقات والدفء في محطات البرد، والداعمة لكل إنجاز.

وختاماً، إلى رفيقات دربي الجميلت، من جمعني بهن العلم والصدقة، وشاركنني لحظات الجد والمزاح، وبصمن في قلبي على أثر ل يمحي: رحاب، يسرى، نور، عبير، ريان، منال، رقية، هبة، ومسعودة، كنتنّ زهرات هذا المشوار، ورفيقات النجاح، وذكريات ل تُنسى... شكراً لأنكن كنتم بعضاً من أجمل فصول حياتي، ورفيقات قلبٍ يعتر بكُن كثيراً.

Résumé

Dans cette étude expérimentale, des plants de tomate ont été cultivés sous serre dans des conditions sahariennes. Deux serres ont été installées : l'une chauffée à l'aide d'un système de chauffage solaire, et l'autre utilisée comme témoin sans chauffage. Plusieurs combinaisons de substrats, incluant du biochar et du fumier de volaille, ont été testées. Les paramètres mesurés comprenaient les températures internes, l'humidité relative, la croissance végétative, les teneurs en chlorophylle et en azote, ainsi que le rendement.

Les résultats ont montré que le substrat présentait un pH légèrement basique (pH= 7,5) et une salinité élevée (CE= 3,5 dS/m), également constatée dans l'eau d'irrigation (CE = 3,2 dS/m). Le chauffage de la serre a permis un gain thermique nocturne de 1 à 2,5 °C et une humidité relative plus stable mais parfois excessive atteignant 90%, pouvant favoriser les pathologies fongiques. Les paramètres végétatifs (hauteur et diamètre de tige) n'ont pas été significativement influencés par les traitements. En revanche, l'indice SPAD et la teneur en azote foliaire ont montré une sensibilité aux apports nutritifs, avec des variations significatives en lien avec la fertilisation fractionnée. Le chauffage solaire a induit une avancée certains stades phénologiques, notamment la maturation de 8 à 14, et a permis un accroissement significatif du rendement qui est passé de 1,9 kg dans les serres non chauffées à 3,6 kg dans les serres avec chauffage pour la première récolte, confirmant l'intérêt agronomique de ce dispositif.

Mots clé : Tomate, Chauffe-eau solaire, agriculture durable, serre agricole, substrats organiques

ملخص

في هذه الدراسة التجريبية، زُرعت شتلات الطماطم داخل بيوت بلاستيكية تحت ظروف مناخية صحراوية. تم تركيب بيتين بلاستيكيين: أحدهما مزود بنظام تدفئة شمسية، والآخر استخدم كعامل شاهد بدون تدفئة. تم اختبار عدة تركيبات من الأوساط الزراعية، شملت الفحم الحيوي (البايوشار) وروث الدجاج. شملت القياسات درجات الحرارة الداخلية، الرطوبة النسبية، النمو الخضري، محتوى الأوراق من الكلوروفيل والنيتروجين، بالإضافة إلى المرودية.

أظهرت النتائج أن الوسط الزراعي كان ذا pH قاعدي قليلاً (pH = 7.5) وملوحة مرتفعة (CE = 3.5 ديسيسيمنز/م)، وهي نفس الملاحظة التي سجلت في مياه الري (CE = 3.2 ديسيسيمنز/م). سمح نظام التدفئة الشمسية بزيادة حرارية ليلية تراوحت بين 1 إلى 2.5 درجات مئوية، مع رطوبة نسبية أكثر استقراراً، لكنها بلغت أحياناً مستويات مرتفعة وصلت إلى 90%، مما قد يشجع على ظهور الأمراض الفطرية. لم تتأثر المعايير الخضرية (مثل الطول وقطر الساق) بشكل معنوي بالمعاملات. من جهة أخرى، أظهر كل من مؤشر SPAD ومحتوى النيتروجين الورقي تأثراً بالتغذية النباتية، حيث ظهرت فروق معنوية مرتبطة بعملية التسميد المجزأ. كما ساهم التسخين الشمسي في تسريع بعض المراحل الفينولوجية، خصوصاً مرحلة النضج التي تقدمت بـ 8 إلى 14 يوماً، وحقق زيادة معتبرة في المرودية، حيث ارتفع الإنتاج من 1.9 كلف في البيوت غير المدفأة إلى 3.6 كلف في البيوت المدفأة خلال أول جني، مما يؤكد أهمية هذا النظام من الناحية الزراعية.

الكلمات المفتاحية : طماطم، سخان شمسي، زراعة مستدامة، بيت بلاستيكي زراعي، ركائز عضوية.

Abstract

In this experimental study, tomato plants were grown in greenhouses under Saharan climatic conditions. Two greenhouses were set up: one equipped with a solar heating system, and the other used as a control without heating. Several substrate combinations, including biochar and poultry manure, were tested. The measured parameters included internal temperatures, relative humidity, vegetative growth, chlorophyll and nitrogen content, as well as yield.

The results showed that the substrate had a slightly alkaline pH (7.5) and high salinity (EC = 3.5 dS/m), which was also observed in the irrigation water (EC = 3.2 dS/m). The solar heating system provided a nighttime temperature gain ranging from 1 to 2.5 °C, with more stable relative humidity—though sometimes excessive, reaching up to 90%, which could promote fungal diseases. Vegetative parameters such as plant height and stem diameter were not significantly affected by the treatments. However, the SPAD index and foliar nitrogen content showed sensitivity to nutrient supply, with significant variations related to fractional fertilization. Solar heating led to an advancement of certain phenological stages, especially fruit ripening by 8 to 14 days, and significantly increased yield—from 1.9 kg in the unheated greenhouses to 3.6 kg in the heated ones during the first harvest—highlighting the agronomic benefit of this system.

Keywords: Tomato, Solar water heater, Sustainable agriculture, Agricultural greenhouse, Organic substrates

Liste des tableaux

Tableau n° 01	division administrative de la région d'Ouargla	5
Tableau n°02	données climatiques de la région de Ouargla (2014 – 2024)	8
Tableau n° 03	Composition des substrats utilisés avec le sol dans les essais de culture	16
Tableau n° 04	Dates d'apparition des principaux stades phénologiques selon les traitements	29

Liste des figures

Figure n° 01	Localisation géographique de la région de Ouargla
Figure n° 02	Modèle du bilane hydrologique schématique des apports-exhaures à Ouargla
Figure n° 03	Schéma général de la serre avec une disposition des sacs en bloc randomisé
Figure n° 04	Evolution de la Températures relative dans les trois conditions de cultures
Figure n°05	Evolution de l'humidité relative dans les trois conditions de cultures
Figure n° 06 et 07	Évolution de la hauteur des tiges en fonction des jours
Figure n° 08 et 09	Évolution du diamètre des tiges en fonction des jours
Figure n° 10	Evolution de SPAD en fonction des semaines
Figure n° 11 et 12	Evolution de d'azote foliaire en fonction des semaines
Figure n° 13	Rendements en tomate obtenues dans les déférentes conditions

Liste des photos

Photo n° 01	Installation des serres
Photo n° 02	chauffage solaire
Photo n° 03	Préparation du biochar dans un four à pyrolyse
Photo n° 04	Engrais chimique 15 15 15
Photo n° 05	Système d'irrigation goutte à goutte
Photo n° 06	Plants de tomate prêts au repiquage
Photo n° 07	Opération de transplantation
Photo n° 08	Enregistreur de température et l'humidité relative
Photo n° 09	Etat des plantes au stade fructification : A) serre non chauffée B) serre chauffée
Photo n° 10	Tomates au stade de maturation en serre chauffée

Table de matière

Remerciements	
Dédicaces	
Résumé	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des photos	
Introduction	1
Chapitre I : Présentation de région d'étude d'Ouargla	
I.1. Situation géographique de la région d'Ouargla	4
I.2. Potentialités naturelles de la région	5

I.2.1. Les sols sahariens	5
I.3.Contexte hydrogéologique	6
I.3.1.Nappe du Continental Intercalaire (CI)	6
I.3.2.Nappe du Complexe Terminal (CT)	7
I.3.3.Nappe phréatique	7
I.4.Le climat	7
I.4.1.La température	8
I.4.2.Précipitations	8
I.4.3.Humidité relative	9
I.4.4.Le vent	9
I.4.5.La pluviométrie	9
Chapitre II : Matériels et Méthodes	
II.1. Lieu de l'expérimentation	12
II.2. Installation des serres	12
II.3.Système de chauffage	13
II.4. Préparation des substrats de culture	13
II.4.1. Sable de dune	14
II.4.2.Préparation du biochar	14
II.4.3. Fumier de volaille	15
II.4.4. Engrais chimique 15 15 15	15
II.4.5. Préparation des mélanges de substrats et remplissage des sacs de cultures	15
II.5. Réseau d'irrigation	16
II.6.Choix de la variété de tomate	17
II.7.Plan expérimental appliqué	18
II.8.Suivie des températures et de l'humidité	18
II.9. Suivi des plantes	19
II.9.1. Irrigation	19
II.9.2. Mesure de la hauteur et diamètre des tiges	19
II.9.3. Mesure des taux de chlorophylle et d'azote dans les feuilles	20
II.9.4. Suivi des paramètres de reproduction : floraison, fructification et maturation	20
II.10.Rendement	20
Chapitre III : Résultats et discussion	
III.1.pH et Conductivité électrique (CE) du sable de culture	23
III.2.pH et CE de l'eau d'irrigation	23
III.3.Conditions microclimatiques des serres	23
III.3.1.Températures	23
III.3.2.Humidité relative	25
III.4.Evolution des paramètres végétatifs	25
III.4.1.Hauteur de tige (HT)	25
III.4.2.Diamètre de tige (QT)	26
III.5.Taux de chlorophylle	26
III.5.1.Evolution de SPAD	27
III.5.2. Evolution de N	28
III.6 Paramètres de reproduction (Floraison, Fructification, Maturation)	29
III.7.Rendement en tomate	30
Conclusion	
Référence	

Introduction

Introduction

La tomate (*Solanum lycopersicum* L.) est l'une des plantes cultivées les plus importantes appartenant à la famille des Solanacées (Xu et al. 2022). Selon Sattar et al. (2024), elle est classée deuxième légume produit à l'échelle mondiale après la pomme de terre, représentant 16 % de la production végétale totale. Prospérant sous les climats tropicaux et tempérés, les tomates sont cultivées dans le monde entier pour la consommation locale et comme culture d'exportation, et poussent mieux sous les serres des régions tempérées (Poojitha, 2023).

La production de tomate en Algérie est importante, aussi bien pour les tomates fraîches que pour la tomate industrielle. En 2023, la production des tomates a atteint plus 1.68 millions de tonnes, sur une superficie cultivée d'environ 24186 hectares (FAOSTAT, 2023).

La tomate, plante originaire des régions chaudes, s'adapte bien aux différentes zones agro climatiques de l'Algérie. Elle peut être cultivée tout au long de l'année selon les régions et les modes de production. En arrière-saison, la culture de tomate est pratiquée principalement dans le littoral centre et ouest du pays. En primeur, elle est cultivée sur le littoral grâce à des conditions climatiques douces. La culture sous serre, quant à elle, est bien développée aussi bien dans les régions littorales que dans les zones sahariennes, comme Biskra, El Oued et Ouargla, où elle permet de produire en contre-saison. En plein champ et en pleine saison, la tomate est cultivée dans toutes les régions du pays (ITCMI, 2022).

Durant la saison froide, les températures basses constituent un facteur limitant majeur pour la culture des légumes sensibles comme la tomate. Elles ralentissent la croissance, nuisent à la nouaison et peuvent compromettre la production (Ruelland et al. 2009). Pour y faire face, le chauffage des serres apparaît comme une solution technique efficace permettant de maintenir un microclimat favorable au développement des plantes.

En Algérie, la géothermie qui est une source d'énergie qualifiée de nouvelle, douce et renouvelable, n'est exploitée pour le chauffage des serres agricoles qu'à partir des années 70 et c'était une contribution assez modeste de l'énergie géothermale dans le développement du secteur agricole Bouchekima et Babi (2001). Depuis, plusieurs études ont été menées ici et là sur l'utilisation de la géothermie dans le chauffage des serres, mais son déploiement à grande échelle reste encore limité et n'a pas été concrétisé.

Ces dernières années, des initiatives ont émergé pour exploiter l'énergie solaire dans le chauffage des eaux destinées à l'utilisation dans différents secteurs. Cette technique reste très peu

utilisée et ceci est particulièrement dû au fait que l'énergie conventionnelle (électricité et gaz) est abondante et bon marché alors que le chauffe-eau solaire, tel que développé, est très cher et non adapté aux conditions des régions sahariennes (poids élevé et non adapté à l'habitat saharien, des températures très élevées en période estivale) (Bouhired, 2010).

Outre les conditions climatiques, la nutrition minérale constitue un facteur déterminant pour le bon développement végétatif et reproductif de la tomate, en culture sous serre. Un apport équilibré en macroéléments, notamment l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K), est essentiel pour soutenir la croissance, la floraison, la nouaison et la production de fruits (Marschner, 2012). Parallèlement, des amendements organiques tels que le fumier de volaille, riche en azote et en matière organique, ainsi que le biochar issu de biomasses locales, ont été incorporés dans le substrat. Le fumier de volaille améliore significativement la fertilité du sol et les rendements de la tomate, notamment en sol sableux (Thiaw, 2017). Quant au biochar, il joue un rôle complémentaire en améliorant la structure du sol, la capacité de rétention en eau, l'activité microbienne et la disponibilité progressive des éléments nutritifs (Laurin-Lanctôt, 2015 ; El-Naggar *et al.*, 2019).

Dans cette étude, nous nous sommes fixés comme objectifs principaux d'évaluer, d'une part, l'efficacité d'un système de chauffage solaire utilisant un chauffe-eau solaire dans une serre plastique de 12 m² durant la période hivernale, comparée à une autre serre non chauffée. D'autre part, nous avons examiné l'effet d'amendements organiques, en particulier le fumier de volaille et le biochar produit à partir de feuilles sèches de palmier dattier, appliqués à différentes doses, sur la croissance, le développement et le rendement des plants de tomate. Ces traitements ont été comparés à une fertilisation minérale standard à base d'engrais NPK (15-15-15), couramment utilisée dans les systèmes de culture sous serre. L'ensemble de ce travail vise à identifier des solutions techniques durables.

L'utilisation du biochar issu des feuilles sèches du palmier dattier constitue une stratégie de valorisation des sous-produits agricoles locaux. Cette approche s'inscrit dans une logique d'économie circulaire et de durabilité, particulièrement adaptée aux zones arides comme la région de Ouargla.

Chapitre I

Présentation de région d'étude d'Ouargla

I.1. Situation géographique de la région d'Ouargla

La région d'Ouargla est située au Nord-est de l'Algérie, à environ 800 Km de la capitale Alger. Elle se situe au fond d'une large cuvette de la vallée de l'Oued M'ya. La ville de Ouargla, chef lieu de la wilaya, est située à une altitude de 157 mètres, ses coordonnées géographiques sont : 31° 58' de latitude Nord et 5° 20' Est.

Elle couvre une superficie de 99000 ha, est limitée par :

- Touggourt : au nord ;
- Hassi Messaoud : au Sud ;
- El Oued : à l'Est ;
- Ghardaïa : à l'Ouest.

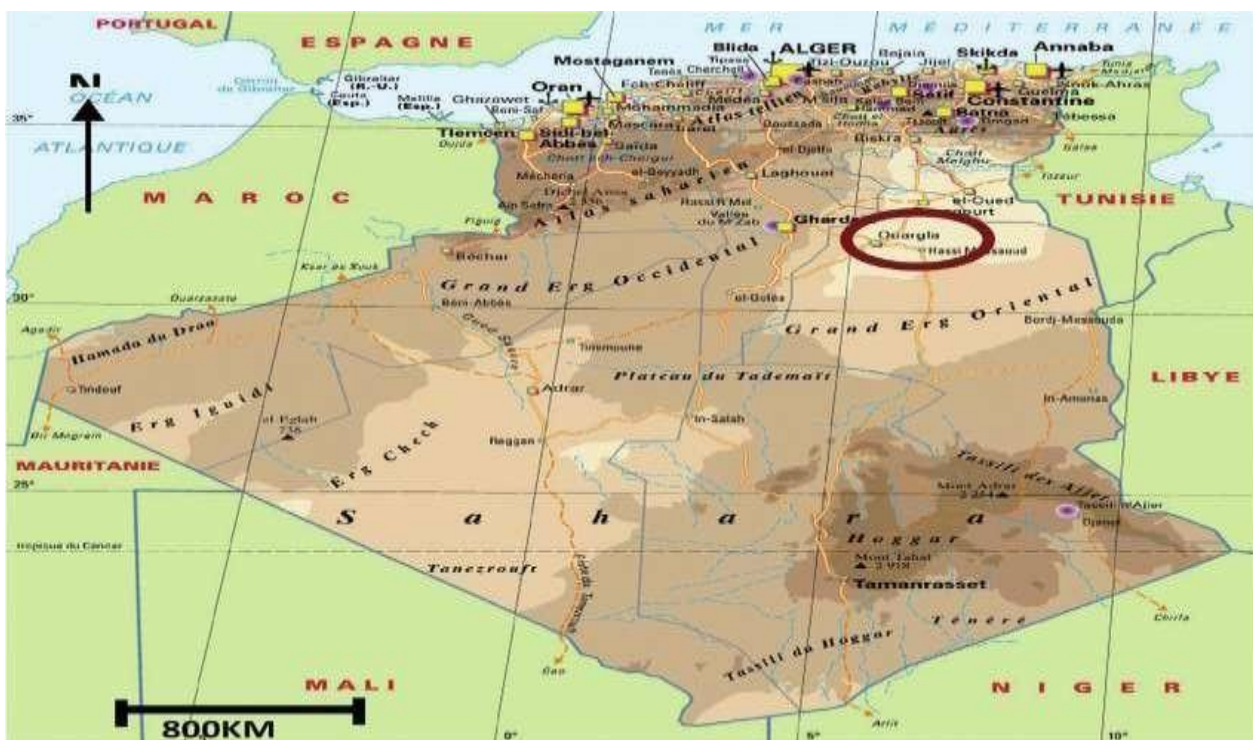


Figure 1 : localisation géographique de la région de Ouargla

Elle comporte six communes, regroupées en 03 Daïras, comme le montre le tableau suivant :

Tableau 01: division administrative de la région d’Ouargla :

Daïras	Communes	Localités
Ouargla	Ouargla	
	Rouissat	
Sidi Khouiled	Hassi Ben Abdallah	Hassi Ben Abdallah,
	Ain Beida	Ain Beida, Chott, Adjadja,
	Sidi Khouiled	Oum Raneb, Aouinet Moussa
N’Goussa	N’Goussa	Larbaa, El Bour, El Koum, Ghers Boughaoufala,

Source : DPAT d’Ouargla (2007).

I.2. Potentialités naturelles de la région

Elle renferme des potentialités naturelles permettant son développement agricole, sous l’effet conjugué des ressources hydriques abondantes, des superficies immenses en sols et des conditions climatiques variées.

I.2.1. Les sols sahariens

Au Sahara, la couverture pédologique présente une grande hétérogénéité et se compose de classes différentes telles que : les sols minéraux, sols peu évolués, sols halomorphes et les sols hydromorphes. La fraction minérale est constituée dans sa quasi-totalité de sable. La fraction organique est très faible (< à 1%) et ne permet pas une bonne agrégation. Ces sols squelettiques sont peu fertiles car leur capacité rétention en eau est très faible, n’excédant pas 8 % du volume d’eau disponible pour les plantes est très faible (< à 1%) et ne permet pas une bonne agrégation. Ces sols squelettiques sont peu fertiles car leur rétention en eau est très faible, environ 8% du volume d’eau disponible (BNEDER, 1994).

Dans la région d’Ouargla, la majorité des sols se situe dans des zones planes ou dans des dépressions. Ils se caractérisent par une forte hydromorphie et une salinité élevée, à l’exception de certains sols qui se situent dans la périphérie Nord, les autres présentent un caractère fortement salin dominé par le chlorure de sodium (BNEDER, 1994 ; Bousbih et al, 2018).

D’une manière générale, on peut dire que les sols à Ouargla contiennent l’ensemble des éléments nutritifs, mais présentent dans leur majorité des taux faibles par rapport à la teneur souhaitable. Du fait que la fertilisation est limitée aux éléments majeurs, soit N P K, on comprend que le reste des éléments est consommé dès les premières années de cultures ce qui explique la chute des rendements après 03 à 04 campagnes (CHAOUCH, 2006).

I.3. Contexte hydrogéologique

A Ouargla, les formations géologiques contiennent deux grands ensembles de formations aquifères séparés par d'épaisses séries évaporitiques ou argileuses. De la base du Crétacé supérieur, l'ensemble inférieur est appelé "Continental Intercalaire (CI)", et l'ensemble supérieur est appelé "Complexe Terminal (CT)". Une troisième formation, d'importance plus modeste, s'ajoute aux deux précédentes "la nappe Phréatique" (Slimani, 2016).

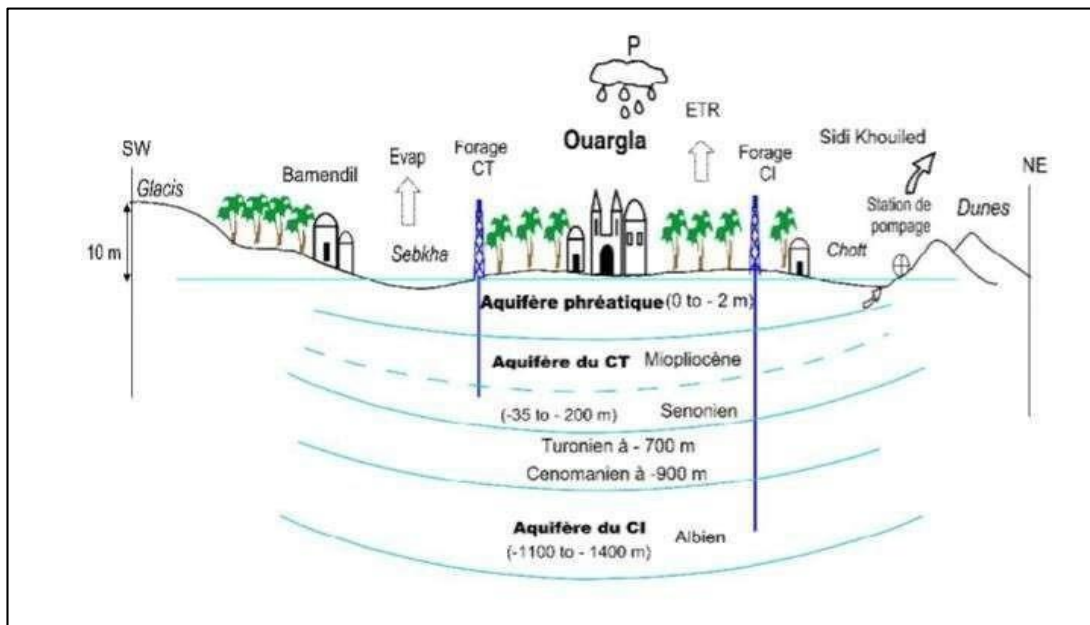


Figure 02: Modèle du bilan hydrologique schématique des apports-exhaures à Ouargla (Slimani, 2016)

I.3.1. Nappe du Continental Intercalaire (CI)

La nappe du Continental Intercalaire est contenue dans des formations sablo-gréseuses et argilo-sableuses. Elle est comprise entre le Trias et le Crétacé inférieur, et porte souvent, de manière restrictive, le nom de nappe de l'Albien en référence à son étage supérieur (Cornet et Gouscov 1952; Cornet, 1961 ; UNESCO, 1972; Slimani, 2016), C'est un énorme réservoir qui est alimenté par l'infiltration des eaux dans l'Atlas saharien et suralimenté par les eaux circulant sous la hamada sud-oranienne et sous l'Erg Occidental (Cornet, 1964; Castany, 1982). Cet aquifère a une très forte charge; à l'altitude de Ouargla, la pression en tête des forages est de l'ordre de 30 kg/cm² et les débits les plus importants sont obtenus par artésianisme (Slimani, 2016).

I.3.2. Nappe du Complexe Terminal (CT)

Le Complexe Terminal (CT) regroupe plusieurs formations litho-stratigraphiques dans lesquelles se trouvent des formations aquifères contenues dans les horizons perméables du Crétacé

supérieur et du Tertiaire. Sur le territoire algérien, il existe deux formations aquifères distinctes dans ce Complexe Terminal (Cornet, 1964; Nesson, 1978; Castany, 1982; Slimani, 2016).

La première est contenue dans les sables du Miopliocène, tandis que la seconde se trouve dans le Sénonien supérieur et l'Eocène inférieur (Sénonien pour Ouargla principalement).

Les nappes du Complexe Terminal sont essentiellement alimentées par les eaux de ruissellement qui proviennent des reliefs de la périphérie du bassin, ainsi que par les infiltrations qui s'effectuent à travers l'Erg Oriental (BRL-BNEDER, 1999 in Slimani, 2016).

I.3.3. Nappe phréatique

La nappe phréatique est contenue dans les formations Quaternaires composées essentiellement d'alluvions de la vallée de l'oued Mya. Elle couvre pratiquement toute la cuvette d'Ouargla. Les sables de surface du Quaternaire renferment la nappe qui est constituée de sable fin à moyen argileux, rarement grossier au sud de Ouargla, et plus on se dirige vers le nord (N'goussa et Sebkhet Safioune) les sables sont riches en gypse, qui devient dominant à Sebkhet Safioune. Sa frange capillaire affleure souvent sur la surface du sol sous forme de petits chotts qu'on retrouve de part et d'autre dans la ville de Ouargla (Bonnard et Gardel, 2003; Hamdi-Aïssa, 2001 ; Slimani, 2016).

I.4. Le climat

Les régions sahariennes sont définies comme étant des milieux aux précipitations annuelles très faibles et aléatoires, soumises à une forte évaporation, une humidité relative faible, une luminosité intense, de grands écarts thermiques et des vents de sables très agressifs

Le climat de la région d'Ouargla est saharien, chaud et sec en été et froid en hiver. La région se caractérise par des précipitations rares et irrégulières, par des températures et évaporations très élevées, avec un faible taux d'humidité relative de l'air (Toutain, 1979 et Ozenda, 1991). La présente caractérisation est faite à partir d'une synthèse climatique de données de l'Office National de Météorologie (O.N.M) pour 10 ans de 2013 à 2022 pour Ouargla.

Tableau 02: données climatiques de la région de Ouargla (2014 – 2024) :

Année	T	TM	Tm	PP	V	RA	SN	TS	FG	TN	GR
2014	24.5	31.7	16.9	31.7	13.7	9	0	5	0	0	1
2015	23.6	30.4	16.2	29.20	11.5	12	0	4	3	0	0
2016	24.4	31.7	17	16.51	13.8	13	2	1	2	0	0
2017	23.4	30.4	16.2	75.17	14.2	17	0	3	0	0	0

2018	23.9	30.8	16.8	23.11	14.1	13	0	11	2	0	0
2019	23.8	30.9	16.3	25.41	13.1	13	0	8	0	0	0
2020	24.1	31.2	16.5	13.21	12.5	11	0	4	0	0	0
2021	24.9	31.6	17.6	33.78	12.6	6	0	6	0	0	0
2022	24.4	31.2	17.1	2.27	11	7	0	5	0	0	0
2023	24.3	31	17	32.77	12.1	12	0	5	1	0	0

Source : ONM (2024).

Interprétation valeurs climatiques moyennes annuelle

T	Température moyenne annuelle (°C)
TM	Température maximale moyenne annuelle (°C)
Tm	Température minimale moyenne annuelle (°C)
PP	Précipitation totale annuelle de pluie et/ou neige fondue (mm)
V	Vitesse moyenne annuelle du vent (km/h)
RA	Total jours de pluie durant l'année
SN	Total jours de neige durant l'année
TS	Total jours de tempête durant l'année
FG	Total jours de brouillard durant l'année
TN	Total jours de tornades ou nuages en entonnoir durant l'année
GR	Total jours de grêle durant l'année

I.4.1. Température

La région de Ouargla se caractérise par un climat très froid en hiver et extrêmement chaud en été. Le mois le plus chaud est juillet, avec une température maximale moyenne annuelle de 44,1 °C pour la période 2013-2022, tandis que la température minimale moyenne durant la même période est de 4,7 °C au mois de janvier (O.N.M, 2020).

I.4.2. Précipitations

La région d'Ouargla se caractérise par un climat sec où les précipitations sont très rares. Les données indiquent que la valeur maximale des précipitations moyennes annuelles est de 8,5 mm au mois de janvier, considéré comme le mois le plus pluvieux, tandis qu'elle est de l'ordre de 0,4 mm au mois de juillet, le mois le plus sec (O.N.M, 2020).

I.4.3. Humidité relative

Les valeurs d'humidité relative moyenne annuelle enregistrées au niveau de la station de Ouargla montrent que l'humidité relative moyenne des valeurs mensuelles maximales sur une décennie débutant en 2013 est de l'ordre de 83 % au mois de décembre, considéré comme le mois le

plus humide, tandis que la valeur minimale est enregistrée en juillet, le mois le plus sec, avec 13 % (O.N.M, 2020).

I.4.4. Le vent

Dans la région d'Ouargla, les vents soufflent suivant différentes directions. Les données indiquent que la valeur moyenne mensuelle maximale de la vitesse du vent est de l'ordre de 78 km/h au mois d'avril, tandis que la valeur minimale est de l'ordre de 43 km/h aux mois de novembre et décembre (O.N.M, 2020).

I.4.5. La pluviométrie

Les pluies sont très faibles et irrégulières, elles sont de l'ordre de 36,96 mm/an concentrées surtout entre le mois d'Octobre et Mars. L'agriculture, de ce fait, ne peut pas se faire sans qu'il y est apport supplémentaire en eau d'irrigation. Des maximas et minimas sont respectivement de 43,47°C et 4,98°C.

Pour les autres paramètres, on peut dire aussi que :

- La vitesse moyenne annuelle des vents est de 3,74 m/s. Les vents dominants sont ceux du NNE et du SSE et les tempêtes de sables se manifestent pendant le printemps.
- L'insolation est d'une moyenne de 8,50 h/j/an et varie entre 8 h/j en hiver et 9 à 12 h/j en hiver. L'intensité lumineuse est très importante pendant les périodes de grandes chaleurs.
- L'humidité de l'air est faible, elle oscille entre 24,69 % en été (au mois de juillet) et 60,15 % en hiver (au mois de janvier).
- L'évaporation est très importante, elle d'une moyenne annuelle 3067,80 mm. Son maximum est enregistré au mois de juillet, avec plus de 468,46mm d'eau évaporée, et le minimum est enregistré au mois de janvier avec 99,84 mm
- Le diagramme ombrothermique de la région d'Ouargla montre, quant à lui, que la période sèche s'étale sur toute l'année.

Chapitre II

Matériels et Méthodes

Lieu de l'expérimentation

Cette étude s'est déroulée au niveau de l'exploitation agricole de l'Université Kasdi Merbah à Ouargla. L'endroit choisi pour l'installation des serres et du système de chauffage solaire a été

sélectionné en tenant compte de plusieurs critères techniques et environnementaux. Il s'agit d'un site accessible, dégagé et bien exposée au soleil, afin d'assurer un bon fonctionnement du chauffe-eau solaire. De plus, le site est situé à proximité du forage d'eau de l'exploitation.

II.1. Installation des serres

Les deux serres ont été installées en octobre 2024. Chacune occupe une superficie de 12 m² et est équipée de portes et de fenêtres permettant une bonne circulation de l'air. L'une des serres est chauffée à l'aide du chauffe-eau solaire, tandis que l'autre ne bénéficie d'aucun chauffage et sert de témoin. Des enregistreurs de température et d'humidité ont été placés à l'intérieur des deux serres ainsi qu'à l'extérieur, afin de suivre précisément les variations climatiques. Le fonctionnement du système de chauffage solaire est automatiquement régulé par un thermostat à déclenchement (voir schéma).



Photo 01: Installation des serres

II.2. Système de chauffage

Nous avons utilisé un système de chauffage basé sur un chauffe-eau solaire afin d'améliorer les conditions thermiques dans l'une des deux serres utilisées durant la saison hivernale où l'ensoleillement est élevé mais les températures nocturnes peuvent chuter fortement.

Ce système capte l'énergie solaire à l'aide de capteurs thermiques, stocke la chaleur dans un réservoir, puis la redistribue à l'intérieur de la serre via un circuit d'eau chaude. L'objectif est de maintenir une température minimale favorable au développement des plants de tomate (12 à 15 °C) (Attar & Farhat, 2015).



Photo 02 : chauffage solaire

II.3. Préparation des substrats de culture

Des substrats ont été préparés en incorporant au sable de dunes deux amendements organiques : le biochar, issu de la pyrolyse de des palmes sèches, et le fumier de volaille bien décomposé. Ces matières organiques représentent des alternatives durables et adaptées aux contraintes agroécologiques spécifiques des zones arides. À des fins de comparaison, un engrais chimique de type 15-15-15 a été utilisé comme témoin.

II.3.1. Sable de dune

Le sable est couramment utilisé comme substrat de culture dans les systèmes hors-sol. Nous l'avons collecté localement au niveau des dunes de la région de Ouargla où il est abondant et facilement accessible. Son pH ainsi que sa conductivité électrique (CE) ont été mesurés avant utilisation.

Selon Elshony et al. (2008), sa texture grossière assure un bon drainage et une aération adéquate du système racinaire, deux éléments essentiels pour le bon développement des cultures sous serre. Cependant, sa faible capacité de rétention en eau et en nutriments nécessite souvent son association avec des amendements organiques tels que le fumier ou le biochar pour en améliorer les propriétés physico-chimiques (Kheir et al, 2020).

Avant son incorporation dans les substrats de culture, le sable a été analysé pour déterminer son pH et sa conductivité électrique (CE), selon les protocoles décrits par (Aubert, 1978) Pour la mesure du pH, 10 g ont été prélevés, puis mélangés avec 25 ml d'eau distillée.

Après agitation pendant 30 minutes, les échantillons ont été laissés au repos pendant 10 minutes afin de permettre la décantation, puis filtrés à l'aide de papier filtre, après quoi le pH de la solution claire est mesuré. Concernant la CE, une seconde solution a été préparée en mélangeant 10 g du même sable avec 50 ml d'eau distillée, selon la même procédure.

II.3.2. Préparation du biochar

Les palmes sèches du palmier dattier ont été utilisées pour la production du biochar (photo 03). Les échantillons ont été placés dans un four hermétiquement fermé, sous des conditions d'absence en oxygène. La pyrolyse a été réalisée à 500 °C pendant deux heures, telle que décrite par Devi et Saroha (2014).



Photo 03 : Préparation du biochar dans un four à pyrolyse

II.3.3. Fumier de volaille

Le fumier de volaille utilisé dans cette étude provient de la région nord de l'Algérie, où l'élevage avicole est largement répandu. Ce choix repose sur plusieurs avantages agronomiques. Selon Siboukeur (2013), le fumier de volaille est particulièrement riche en azote (N), phosphore (P) et potassium (K), comparé aux autres fumiers, et présente généralement un rapport C/N faible, ce qui favorise une minéralisation rapide et une disponibilité immédiate des nutriments pour les cultures.

Un autre atout majeur de ce type d'amendement est l'absence de graines de mauvaises herbes, contrairement aux fumiers bovins ou ovins, qui peuvent favoriser l'envahissement des palmeraies sahariennes par des espèces indésirables.

II.3.4. Engrais chimique

L'engrais minéral utilisé est un NPK 15-15-15, contenant 15 % d'azote (N), 15 % de phosphore (P) et 15 % de potassium (K).

L'engrais 15-15-15 granulé est considéré comme un engrais universel bien équilibré et économique (photo 04). L'objectif est de fournir aux plantes un apport équilibré en nutriments pour répondre à leurs besoins spécifiques tout au long de leur croissance.



Photo 04 : Engrais chimique

II.3.5. Préparation des mélanges de substrats et remplissage des sacs de cultures

Les sacs de culture en plastique noire (en polyéthylène haute densité PEHD) ont été achetés localement auprès d'un fournisseur spécialisé à Ouargla. Et ont été préparés manuellement, avec une longueur de 50 centimètres et une largeur de 45 centimètres chacun. Ils ont été troués à la base permettant le drainage de l'excès d'eau et une bonne aération des racines, susceptibles de provoquer des maladies fongiques ou des pourritures.

Six formulations différentes de substrats ont été testées pour la culture de tomates (voir tableau 03). Le choix de ces substrats repose sur leur accessibilité, leur coût réduit, et leur adaptation aux contraintes agro-écologiques du milieu saharien

Les sacs ont été remplis de 25 litres de mélanges, dans le but d'évaluer les effets individuels et interactifs des suppléments nutritifs sur la croissance et le développement des plants de tomate.

Tableau 03 : Composition des substrats utilisés avec le sol dans les essais de culture

Substrats	Composition du substrat	Répétitions
S1	Sable+10% fumier +NPK	Quatre répétitions dans chaque serre
S2	Sable+7% fumier+3% biochar +NPK	//
S3	Sable+5% fumier+5% biochar +NPK	//
S4	Sable+5% biochar +NPK	//
S5	Sable+5% fumier+5% biochar	//
S6	Sable+7% fumier+3% biochar	//

Dans cette expérimentation, nous avons opté pour des doses modérées de biochar (3 % et 5 %) (Lehmann et Joseph, 2015) et de fumier de volaille (5 %, 7 % et 10 %) (Abou El-Magd, 2012) en mélange au sable de dunes, afin d'améliorer la fertilité du substrat tout en évitant les effets potentiellement négatifs associés à des taux plus élevés.

L'engrais minéral NPK (15-15-15) a été utilisé. La dose appliquée a été calculée de manière à correspondre à une fertilisation standard de 300-1000 kg/ha (Adekiya et Agbede, 2009), recommandée pour la culture de la tomate en sol sableux. En tenant compte du volume des sacs utilisés (25 litres), cette dose a été d'environ 3,75 g/sac et apportée trois fois à la plante pendant les 1, 6 et 12 semaines.

II.4. Réseau d'irrigation

L'irrigation est assurée par l'eau de forage du Continental Terminal, situé à quelques mètres du lieu d'installation des serres, au niveau de l'exploitation agricole de l'Université de Ouargla. Des mesures de pH et de conductivité électrique (CE) ont été réalisées afin de caractériser cette eau.

Nous avons adopté un système d'irrigation goutte en raison de ses nombreux avantages, particulièrement adaptés aux conditions des sols sableux drainants de la région de Ouargla et permet un apport localisé de l'eau directement à la zone racinaire, réduisant ainsi les pertes par évaporation.



Photo 05 : Système d'irrigation goutte à goutte

II.5. Choix de la variété de tomate

Nous avons choisi une variété indéterminée, TYLCV résistante, ayant pour nom commercial Hayat (Photos 6 et 7). C'est une variété prisée, particulièrement dans la région de Biskra, pour sa résistance aux maladies et sa bonne tenue au champ. Elle nous a été fournie par un agriculteur de la région de M'ziraa où elle est la plus cultivée.

Les plants de tomates ont été transplantés le 19 Novembre 2025.



Photo 06: Plants de tomate prêts au repiquage



Photo 07 : Opération de transplantation

II.6. Plan expérimental appliqué

L'expérimentation a été conduite selon un dispositif en blocs complets randomisés (autrement appelé blocs aléatoires complets), où tous les traitements sont représentés dans chaque bloc d'une manière aléatoire afin de minimiser les biais liés à la position. Six combinaisons de traitements ont été appliquées et chaque combinaison a été répétée 04 fois. Les sacs de culture sont disposés selon un espacement défini de 50 cm entre les sacs et de 80 cm entre les rangs (Figure 03).

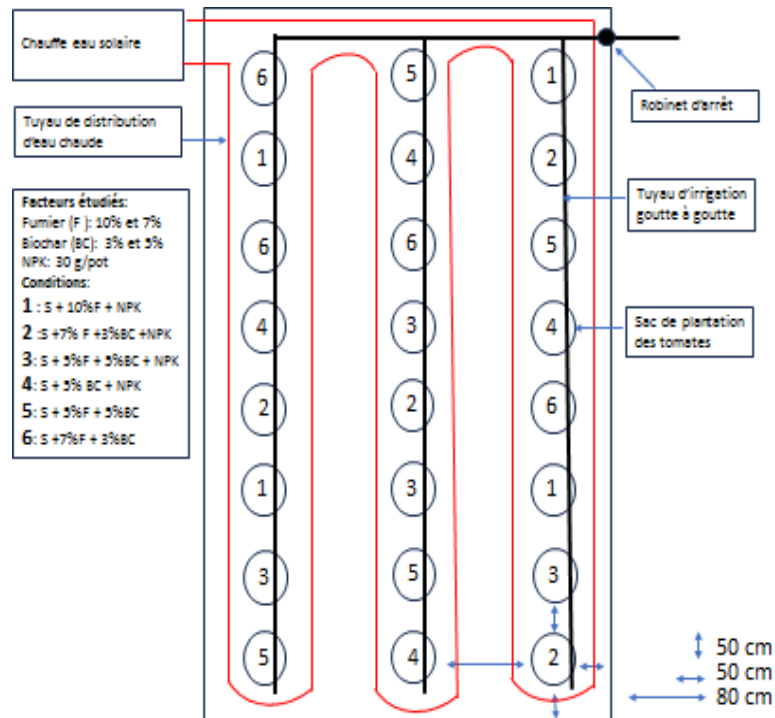


Figure 03 : Schéma général de la serre chauffée avec tous les éléments

II.7. Suivi des températures et de l'humidité

Le suivi régulier de la température et de l'humidité relative à l'intérieur des serres constitue un élément fondamental pour maîtriser le microclimat et assurer des conditions optimales à la croissance des plantes. Ces deux paramètres influencent directement des processus physiologiques clés tels que la photosynthèse, la transpiration, la respiration, la floraison et la fructification (Adams et al., 2001 ; Heuvelink, 2005).



Photo 08 : Enregistreur de température et l'humidité relative

II.8. Suivi des plantes

II.8.1. Irrigation

L'irrigation a été assurée par un système goutte-à-goutte, permettant une distribution précise et localisée de l'eau dans tous les sacs. Nous avons réglé le débit à 1 litre d'eau par plante et par une demi-heure.

Durant la période hivernale, marquée par une faible évapotranspiration, l'irrigation était réalisée deux fois par semaine. À partir du mois de mars, avec la hausse progressive des températures, la fréquence a été augmentée à une irrigation tous les deux jours.

II.8.2. Mesure de la hauteur et diamètre des tiges

La hauteur des plants et le diamètre de la tige principale sont deux indicateurs clés de la vigueur et de la croissance des plantes cultivées (Heuvelink, 2005). Dans ce travail, la hauteur des plantes a été mesurée chaque semaine à l'aide d'un ruban mètre, depuis la base du collet jusqu'à l'extrémité apicale. Le diamètre de la tige a, quant à lui, été relevé en même temps que la hauteur à l'aide d'un pied à coulisse numérique, à environ 2 cm au-dessus du collet.

II.8.3. Mesure des taux de chlorophylle et d'azote dans les feuilles

Le suivi de l'état physiologique des plants de tomate a été réalisé à l'aide d'un chlorophyllomètre portatif de marque BioBase, capable de mesurer simultanément le taux de chlorophylle (exprimé en unités SPAD) et la teneur estimée en azote (%) dans les feuilles. Ces mesures non destructives permettent une évaluation rapide et fiable de la santé physiologique des plantes, notamment en lien avec leur statut en azote, un élément essentiel à la croissance (Uddling et al, 2007).

II.8.4. Suivi des paramètres de reproduction : floraison, fructification et maturation

Le suivi des paramètres de reproduction constitue une étape clé pour évaluer l'impact des conditions de culture (chauffage, substrats, fertilisation...) sur le développement des plants de tomate. Des observations ont été enregistrées chaque semaine, en notant les dates d'apparition de chaque stade. Cela permet de mesurer non seulement la précocité sous l'effet des différents facteurs étudiés.



Photo 09 : Etat des plantes au stade fructification : A) serre non chauffée B) serre chauffée

II.9. Rendement

Selon Peet & Welles (2005), le rendement de la tomate sous serre peut fortement varier selon les facteurs climatiques et nutritionnels, d'où l'importance d'une gestion intégrée optimisée.

À maturité des fruits (rougissement complet), les récoltes ont été réalisées et le nombre de et le poids des fruits ont été déterminés. Ces mesures ont permis d'estimer le rendement moyen par plant (g/plant) pour chaque traitement.



Photo 10 : Tomates au stade de maturation en serre chauffée

Chapitre III

Résultats et discussions

III. Résultats et discussion

III.1. pH et Conductivité électrique (CE) du sable de culture

Les résultats de la mesure du pH du sable utilisé comme substrat avant plantation des tomates, selon la méthode décrite par Aubert (1978), ont révélé une valeur moyenne de 7.5, ce qui indique un milieu légèrement basique. Selon Jones (2008), le pH optimal du sol pour la culture de la tomate se situe entre 6,0 et 6,8, ce qui favorise une disponibilité maximale des nutriments et peut toutefois tolérer des pH allant de 5,5 à 7,5.

Pour la CE, les résultats ont montré une valeur de 3,5 DS/m. Cette valeur classe ce sable parmi les substrats à salinité élevée.

III.2. pH et CE de l'eau d'irrigation

Les résultats ont montré une valeur de 7.2, ce qui indique une eau presque légèrement alcaline. Cette valeur est considérée comme appropriée pour les usages agricoles, car elle ne perturbe pas la disponibilité des éléments nutritifs ni la croissance des plantes. (Ngaram N, 2011)

En ce qui est de la CE, une valeur de 3,2 DS/m a été enregistrée, ce qui classe cette eau comme étant fortement salée.

III.3. Conditions microclimatiques des serres

La température et l'humidité relative comptent parmi les principaux facteurs microclimatiques influençant fortement la croissance des plantes sous serre. Leur maîtrise constitue donc un élément essentiel pour améliorer les performances des cultures en environnement protégé.

III.3.1. Températures

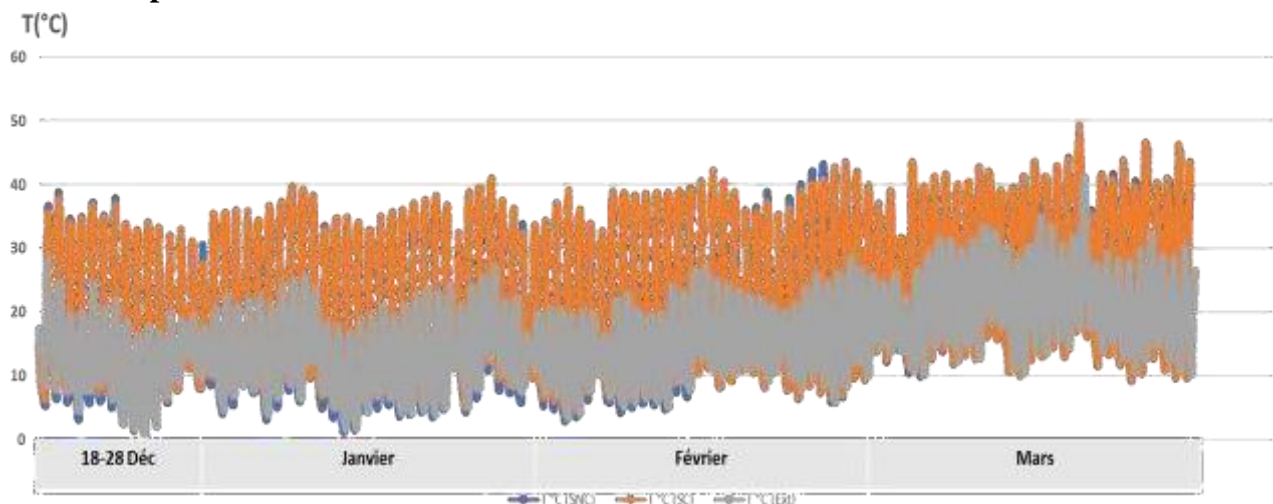


Figure 04 : Evolution de la Températures dans les trois conditions

La figure 04 illustre l'évolution temporelle des températures (°C) durant la période allant du 18 Décembre au 1 Avril 2025.

Jusqu'au 1er mars, date à partir de laquelle les températures nocturnes étaient supérieures à 10°C, les températures moyennes observées étaient de 13,44 °C à l'extérieur, 17,28 °C dans la serre non chauffée, et 18,10 °C dans la serre chauffée. Cela traduit un gain thermique moyen de 4 à 5 °C à l'intérieur des serres par rapport à l'extérieur, et un écart d'environ 1 °C attribuable au chauffage solaire entre les deux serres.

En ce qui concerne les températures nocturnes, les données montrent que lors des nuits où le chauffe-eau solaire a fonctionné efficacement, l'écart de température entre la serre chauffée et non chauffée atteignait 1 à 2,5 °C.

Les amplitudes thermiques (jour/nuit) sont importantes dans les trois conditions, durant la période d'étude. Elles sont plus marquées en serre chauffée, en raison de la forte élévation des températures diurnes sous l'effet combiné du rayonnement solaire et de l'accumulation de chaleur interne, bien que les températures nocturnes soient restées relativement basses, créant ainsi un écart important. Elle est suivie par la serre non chauffée, où les températures de jour sont légèrement plus faibles et celles de nuits un peu plus froides, ce qui maintient une amplitude thermique également élevée. À l'extérieur, les températures maximales sont plus modérées que sous serre avec des nuits plus froides, donnant ainsi un écart jour/nuit moins extrême.

Plusieurs travaux menés dans d'autres pays ont démontré l'efficacité des systèmes de chauffage par énergie solaire thermique dans les serres agricoles. Au Maroc, Ihoume et al. (2022) ont révélé des écarts thermiques nocturnes de 4 °C en faveur de la serre chauffée. En Chine, Jing Zhao et al. (2025) ont obtenu un gain thermique nocturne allant de 3,6 et 4,9 °C en fonction des méthodes appliquées.

En comparaison, le système de chauffe-eau que nous avons utilisé a permis un gain thermique modeste variant de 1 à 2,5 °C selon les nuits. Cette performance, bien que plus faible que celle rapportée dans les systèmes à plus grande échelle, reste pertinente dans le contexte saharien local, où les variations thermiques sont extrêmes et les moyens technologiques limités.

III.3.2. Humidité relative

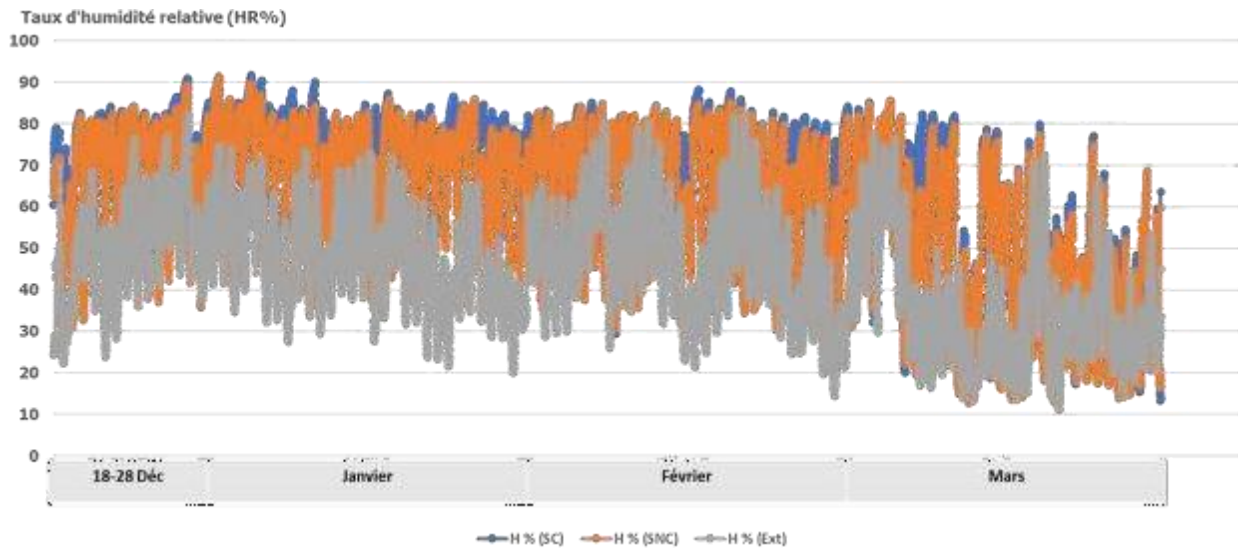


Figure 05 : Evolution de l'humidité relative dans les trois conditions

Le suivi de l'humidité relative a été réalisé durant la période du 18 décembre au début avril. Globalement, elle apparaît plus élevée dans la serre chauffée avec des valeurs oscillant entre 40 et 80 %, avec un max de 90% par moment, suivie par la serre non chauffée et de l'extérieur.

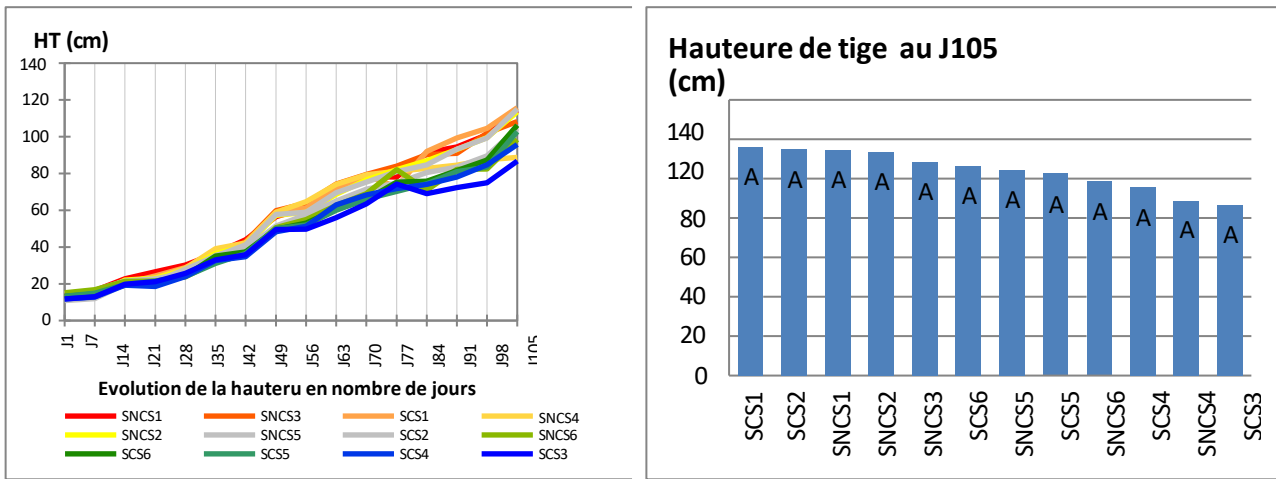
Les différences entre les serres sont particulièrement notables, avec une HR plus stable et plus élevée, probablement en lien avec la température intérieure plus homogène et une meilleure rétention d'humidité. À l'inverse, l'HR extérieure présente de fortes amplitudes journalières, témoignant d'une influence climatique directe (vent, dessiccation, air sec).

Ces niveaux d'humidité, bien qu'ils puissent contribuer à limiter le stress hydrique durant la saison hivernale, s'éloignent néanmoins de la plage optimale recommandée pour la culture de la tomate, qui se situe entre 60 % et 70 % (Jones, 2007 ; Shamshiri et al., 2018). Lorsque l'humidité relative dépasse 80 %, elle peut perturber plusieurs processus physiologiques, notamment la transpiration et favorise le développement de maladies cryptogamiques telles que le *Botrytis cinerea* ou l'oïdium, surtout en l'absence d'une ventilation suffisante.

III.4. Evolution des paramètres végétatifs

III.4.1. Hauteur de tige (HT)

Les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) (**figures 06 et 07**) montrent que l'évolution de la hauteur des tiges n'a pas révélé de différences significatives. Cela indique que les traitements auxquels les plantes ont été soumises n'ont pas eu d'effet significatif.



Figures 06 et 07 : Évolution de la hauteur des tiges en fonction des jours

Les résultats obtenus par Masmoudi et Chergui. (2016), soutiennent et confirment ceux de notre étude, en montrant l'absence de différences statistiquement significatives dans la hauteur des plants de tomate.

Au contraire, les résultats rapportés Kevin et al. (2021), montrent une variation de la hauteur des tiges entre les groupes étudiés. Cette différence pourrait s'expliquer par le type de substrat utilisé pour la culture ou par la méthode de plantation, ce qui suggère que ces facteurs ont eu un impact notable sur le développement en hauteur des tiges.

III.4.2. Diamètre de tige (DT)

Comme pour la HT, les résultats (**Figure 08 et 09**) n'ont montré aucune différence significative dans l'évolution du diamètre de la tige. Cela suggère que ce paramètre n'a pas été influencé par les conditions expérimentales appliquées

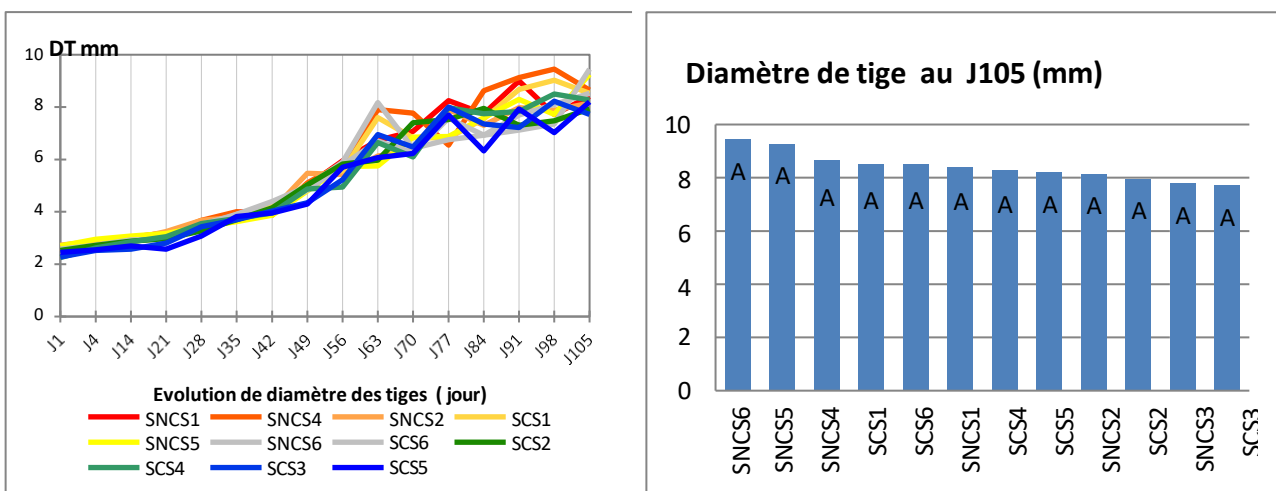


Figure 08 et 09 : Évolution du diamètre des tiges en fonction des jours

Cette absence d'effet marqué peut s'expliquer par plusieurs facteurs. D'une part, l'écart de Température enregistré entre les deux serres est resté relativement faible, autour de 1 à 2 °C, ce qui

pourrait ne pas suffire à induire un impact physiologique significatif sur la croissance végétative, notamment en période hivernale où l'intensité lumineuse constitue souvent un facteur limitant majeur pour l'élongation des tiges (Heuvelink, 2005).

D'autre part, il est possible que les amendements organiques appliqués (biochar et fumier de volaille) ont pu améliorer de manière comparable les propriétés du substrat (aération, rétention d'eau, disponibilité en nutriments), réduisant ainsi les écarts de performance entre traitements.

III.5. Taux de chlorophylle

L'analyse statistique de l'indice SPAD sur une période de 15 semaines a révélé des différences significatives aux semaines 2, 3, 6, 7, 9 et 12 (**Figure 10**). Ces variations traduisent l'influence des apports d'engrais apportés par fractionnement.

Les premières différences significatives, observées dès les semaines 2, 3, 6 et 7 indiquent une réponse précoce des plantes à l'apport d'engrais, riches en éléments rapidement assimilables.

Enfin, l'augmentation de l'indice SPAD aux semaines 9 et 12 est attribuée à l'effet de l'engrais chimique et aussi aux températures qui ont augmenté à partir de la fin février, connues pour stimuler la synthèse de chlorophylle. Ces résultats confirment la sensibilité de l'indice SPAD à la disponibilité des nutriments et soulignent des différences d'efficacité entre les traitements appliqués.

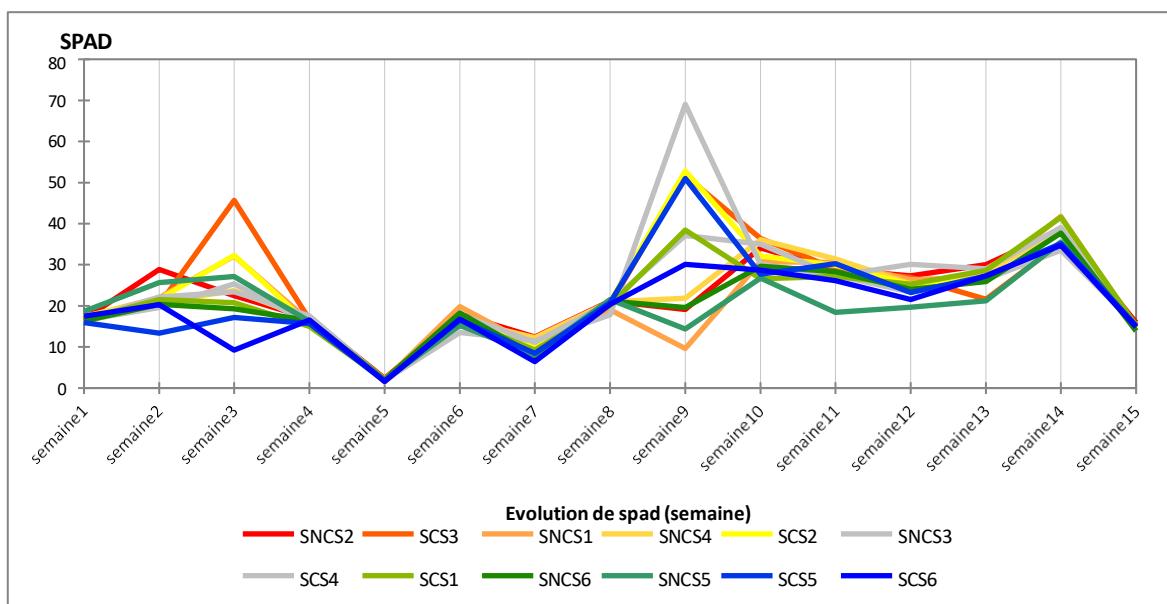


Figure 10 : Evolution de SPAD en fonction des semaines

En comparant les résultats de notre étude à ceux de l'étude de Fuchs et al. (2020), une différence marquée dans l'évolution de l'indice SPAD est observée. Cette étude a montré une stabilité

importante de l'indice SPAD grâce à l'utilisation du digestat liquide, un engrais organique riche en azote issu de la méthanisation.

Cette stabilité est attribuée à une stratégie de fertilisation fractionnée et régulière, permettant un apport progressif et équilibré en azote, sans variations brutales de la teneur en chlorophylle dans les feuilles. En revanche, notre protocole expérimental, basé sur une fertilisation chimique (NPK) appliquée de manière ponctuelle, a conduit à des fluctuations notables du SPAD, traduisant une réponse physiologique plus irrégulière des plantes.

III.5.2. Evolution de N

L'évolution de la concentration en azote foliaire sur 15 semaines a révélé des différences significatives aux semaines 3, 6, 7, 9, 11 et 12 (**Figure 11 et 12**). Ces résultats mettent en évidence l'impact du type et du moment d'apport en éléments nutritifs sur l'absorption de l'azote par les plantes.

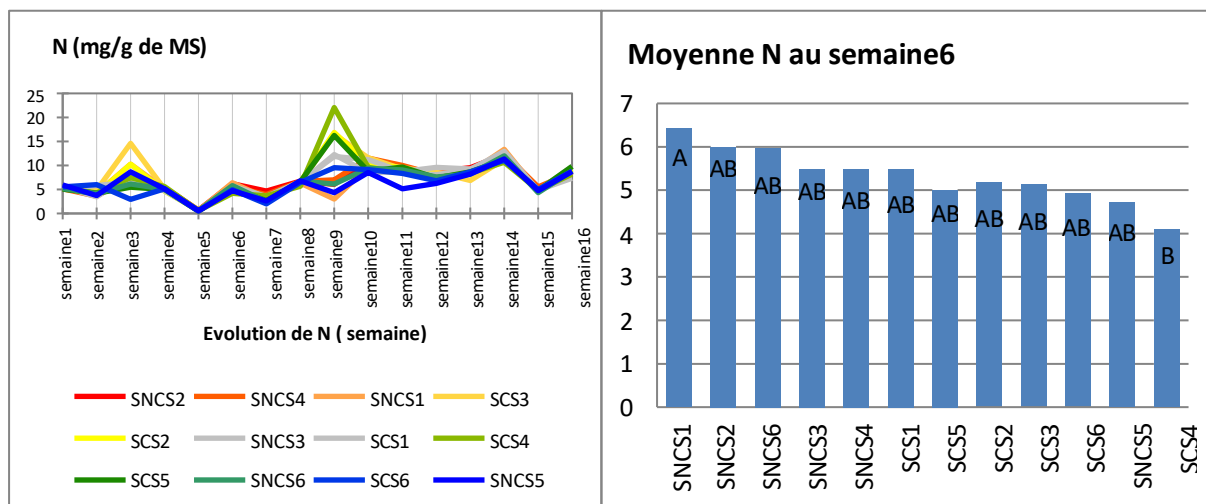


Figure 11 et 12 : Evolution de l'azote foliaire en fonction des semaines

En outre, il est remarqué qu'une évolution parallèle des concentrations en azote foliaire et des valeurs SPAD a été observée au cours des différentes semaines de suivi. Les variations significatives constatées entre les traitements apparaissent aux mêmes périodes pour les deux paramètres, ce qui confirme la forte corrélation entre l'indice SPAD et la teneur en azote des feuilles. Ces résultats sont en accord avec ceux de Peng et al. (1993) et Uddling et al. (2007), qui ont montré que l'indice SPAD constitue un bon indicateur indirect de l'état nutritionnel azoté des plantes.

Cela indique que la disponibilité de l'azote dans la plante se reflète directement sur la teneur en chlorophylle. Ce lien est logique, étant donné que l'azote constitue un élément fondamental dans

la synthèse de la chlorophylle. Ainsi, toute variation dans sa disponibilité influence les valeurs mesurées par le SPAD.

III.6. Paramètres de reproduction (Floraison, Fructification, Maturation)

Les paramètres de reproduction tels que la floraison, la fructification et la maturation jouent un rôle essentiel dans le cycle de vie des plantes. Ils déterminent à la fois la qualité et la quantité de la production. Comprendre l'évolution de ces étapes permet d'améliorer les conditions de culture et d'assurer un meilleur rendement.

Conditions	Plantation	Floraison (Jours)	Fructification (Jours)	Maturation (Jours)	Gain de précocité (Jours)
SNC1	19/11/2024	50-52	54-57	122	14
SNC2	19/11/2024	50-52	54-57	122	14
SNC3	19/11/2024	50-52	54-57	119	11
SNC4	19/11/2024	50-52	54-57	122	14
SNC5	19/11/2024	50-52	54-57	118	10
SNC6	19/11/2024	50-52	54-57	118	10
SC1	19/11/2024	48-50	52-57	111	3
SC2	19/11/2024	48-50	52-57	111	3
SC3	19/11/2024	48-50	52-57	108	0
SC4	19/11/2024	48-50	52-57	114	6
SC5	19/11/2024	48-50	52-57	111	3
SC6	19/11/2024	48-50	52-57	108	0

Tableau 04 : Dates d'apparition des principaux stades phénologiques selon les traitements

Les données présentées dans le (tableau 04) révèlent une influence positive du chauffage sur les stades phénologiques de la tomate, notamment la floraison, la fructification et la maturation. La floraison et la fructification apparaissent légèrement plus tôt dans la serre chauffées, avec un décalage de 2 à 4 jours par rapport à la serre non chauffée. En revanche, l'effet du chauffage s'est révélé nettement plus prononcé au stade de la maturation, où une avance remarquable de 8 à 14 jours a été observée.

Les conditions SC3 et SC6 ont particulièrement mis en évidence cette précocité, soulignant l'efficacité du chauffage solaire dans l'accélération du cycle de développement. Cette avance peut

être attribuée à l'amélioration des conditions microclimatiques internes, telles que la température et l'humidité relative, qui influencent favorablement le fonctionnement physiologique des plants.

III.7. Rendement de tomate

L'analyse de la variance (ANOVA) a mis en évidence des différences significatives de rendement entre les serres chauffées et non chauffées, confirmant l'effet positif du chauffage solaire sur la productivité (**Figure 13**). Pour la première grappe de tomate, la condition SC1 en serre chauffée a présenté le rendement moyen par fruit le plus élevé, avoisinant 115 g, suivie des conditions SC3 et SC5, qui ont également affiché de bonnes performances. Ces résultats suggèrent que le chauffage solaire améliore les conditions microclimatiques favorables au développement du fruit, en particulier durant les phases critiques de croissance.



Figure 13 : Rendements en tomate obtenues dans les différentes conditions

Ces résultats confirment les données issues de la littérature scientifique, en particulier celles rapportées par Abdel-Ghany et Al-Helal, (2011), qui ont souligné l'impact positif des systèmes de chauffage solaire sur la productivité des cultures sous serre. En effet, nous avons observé que l'utilisation d'un chauffe-eau solaire a permis une amélioration significative du rendement, avec une production moyenne passant de 1,9 kg dans les serres non chauffées à 3,6 kg dans les serres avec chauffage, et ce, durant la même phase phénologique, à savoir la formation de la première grappe de fruits.

Cette augmentation de près du double est attribuée à la capacité du chauffage solaire à maintenir une température interne plus homogène et optimale pendant les périodes fraîches ou

nocturnes, réduisant ainsi le stress thermique sur les plantes. Un microclimat plus stable favorise l'activité physiologique, notamment la photosynthèse, l'absorption des nutriments et la nouaison, ce qui se traduit directement par une amélioration de la qualité et de la quantité des fruits.

De plus, ces résultats soutiennent ceux obtenus dans notre étude, où les serres chauffées, notamment SC1, SC3 et SC5, ont présenté des rendements supérieurs. Cela démontre que l'intégration d'une technologie passive et écologique telle que le chauffage solaire constitue une solution durable et efficace pour optimiser la production horticole sous serre, tout en limitant la consommation énergétique conventionnelle.

Conclusion

Conclusion

Les résultats obtenus dans cette étude ont permis d'évaluer l'impact des conditions microclimatiques et des substrats de culture sur la croissance et le rendement de la tomate sous serre.

Sur le plan microclimatique, les données ont mis en évidence l'intérêt du chauffage solaire qui a augmenté de 1 à 2,5 °C la température entre les serres chauffées et non chauffées. Cette augmentation n'a pas eu d'effet significatif sur le développement végétatif de hauteur et de diamètre des tiges, mais un effet significatif a été observé pour les paramètres de floraison, de fructification et de maturation des fruits. Un rendement fruitier presque double dans la serre chauffée a été observé confirmant l'efficacité du chauffage.

Concernant la croissance végétative (hauteur et diamètre de tige), aucun effet significatif des traitements expérimentaux n'a été observé, suggérant que d'autres facteurs limitants pourraient jouer un rôle plus déterminant. En revanche, l'indice SPAD et la teneur en azote foliaire ont montré une forte corrélation et une variabilité significative en réponse aux apports d'engrais, traduisant l'impact des pratiques de fertilisation sur la physiologie des plantes.

Enfin, les résultats relatifs à la reproduction et au rendement ont confirmé l'effet bénéfique du chauffage solaire, en particulier sur la précocité de maturation et la production de fruits. Ce gain de rendement, atteignant près du double par rapport aux serres non chauffées, souligne l'intérêt d'une intégration de ce genre solutions durables dans les systèmes de production agricole sous abri.

En somme, cette étude reste une première contribution à l'évaluation d'une solution écologique pour le chauffage des serres en climat saharien. Bien qu'elle a permis de démontrer l'effet du chauffage solaire sur l'élévation des températures et la stabilité de l'humidité relative à l'intérieur de la serre, les gains thermiques enregistrés montrent qu'une marge d'optimisation demeure. Il serait pertinent d'envisager des ajustements techniques, tels que l'augmentation de la surface de captation solaire, l'amélioration de l'isolation ou la régulation du flux thermique, afin de garantir une efficacité comparable aux systèmes les plus performants observés ailleurs.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Abdel-Ghany, A. M., & Al-Helal, I. M. (2011). *Shading effect on tomato plants productivity under greenhouse conditions*. Journal of Agricultural Science, 3(2), 123–134
- Abou El-Magd, M. M., El-Shourbagy, T., & SM, S. (2012). *A comparative study on the productivity of four Egyptian garlic cultivars grown under various organic materials in comparison to conventional chemical fertilizer*. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 6(3), 415-421.
- Adams, S. R., Cockshull, K. E., & Cave, C. R. J. (2001). *Effect of temperature on the growth and development of tomato fruits*. Annals of botany, 88(5), 869-877.
- Adekiya, A. O., & Agbede, T. M. (2009). *Growth and yield of tomato (Lycopersicon esculentum Mill) as influenced by poultry manure and NPK fertilizer*. Emir. J. Food Agric, 21(1), 10-20.
- Aka, B. J. K., Boye, M. A.-D., & N'Gonian, K. S. (2021). *Optimisation de la croissance en pépinière de Solanum Lycopersicon par l'utilisation de substrat biologique [Optimization of nursery growth of Solanum Lycopersicon by the use of biological substrate]*. International Journal of Innovation and Scientific Research.
- Attar, I., & Farhat, A. (2015). *Efficiency evaluation of a solar water heating system applied to the greenhouse climate*. Solar Energy, 119, 212-224.
- Bel, F. Dermagne, F., 1966. *Etude géologique du Continental terminal. Dossier de la Direction de l'énergie et des Carburants* (Ministère de l'Industrie et de l'Energie). Alger, p 22.
- BNEDER. (1999). *Étude du Plan Directeur Général de Développement des Régions Sahariennes. Lot II – Étude de base, phase 3 : Analyse institutionnelle*. (p. 45). Algérie : Bureau National d'Études pour le Développement Rural.
- Bonnard et Gardel., 2003. *La Vallée d'Ouargla. Etudes d'assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation Mesures complémentaires de lutte contre la remontée de la nappe phréatique. Estimation du rôle des palmeraies à la montée de la nappe dans la cuvette d'Ouargla*. Mission IV Autres investigations Volet agro pédologie, p 26.
- Bouhired, F. (2010). *Développement des Chauffe-Eau Solaires en Algérie*. Recherche et Développement. Division solaire thermique et géothermique, 17, 15.
- Bradea, M. S., Abdul-Hussain, A. S., Snoussi, S. A., Beghlal, K., & D'agronomie, D. (2015). *Effet d'un engrais biologique sur la croissance et le rendement de la tomate (Lycopersicum esculentum cerasiforme), cultivée sous serre*. Revue Agrobiologia, 7, 33-37.
- Brl-bneder, 1999. *Etude du plan directeur générale de développement des régions sahariennes*. Lot 1. Etude de base. Phase II A3. Monographies spécialisées des ressources naturelles. Ressources en eau, Vol. 3. Modélisation du Complexe Terminal, p 63.
- Bousbih, S., Zribi, M., El Hajj, M., Baghdadi, N., Lili-Chabaane, Z., Gao, Q., et Fanise, P. (2018). *Soil moisture and irrigation mapping in a semi-arid region, based on the synergetic use of Sentinel-1 and Sentinel-2 data*. Remote Sensing, 10 (12), 1953.
- Castany, G., 1982. *Hydrogéologie, Principes et méthodes*. Ed Dunod, p 238.
- CHAOUCH S., 2006. *Développement agricole durable au Sahara, nouvelles technologies et mutations socio-économiques : Cas de la région de Ouargla*. Thèse Doctorat de l'université Aix-Marseille I, 389 p.

Cornet, A., 1961. *Initiation à l'hydrogéologie saharienne. Cours ronéoté destiné aux officiers du cours préparatoire aux Affaires sahariennes. S.E.S. Birmandreis, Alger, p 108.*

Cornet, A., 1964. *Introduction à l'hydrogéologie saharienne*. Géog. Phys. Et Géol.Dyn., vol. VI, fasc. 1, p 5-72.

DPAT, 2007 : Direction de la Planification et de l'Aménagement du Territoire ; Annuaire

El-Naggar, A. H., Shaheen, S. M., Sarkar, B., Chang, S. X., Tsang, D. C., ... & Ok, Y. S. (2019). *Biochar composition-dependent impacts on soil nutrient release, carbon mineralization, and potential environmental risk: a review*. Journal of environmental management, 241, 458-467.

Elshony, M., Farid, I. M., Alkamar, F., Abbas, M. H., & Abbas, H. (2019). *Ameliorating a sandy soil using biochar and compost amendments and their implications as slow release fertilizers on plant growth*. Egyptian Journal of Soil Science, 59(4), 305-322.

Fuchs, J. G., Schenk, N., Schärer, H.-J., & Weisskopf, L. (2020). *Biogreenhouse: Optimisation de la fertilisation azotée en maraîchage biologique sous serre avec des sous-produits de la méthanisation* (Rapport final du projet BioGreenhouse, 2016–2019). FiBL.
<https://www.fibl.org/fileadmin/documents/fr/projets/biogreenhouse/Biogreenhouse-Rapport-Final-2020,p.39>.

Hamdi-Aïssa, B., 2001. *Le fonctionnement actuel et passé de sols du Nord-Sahara (Cuvette d'Ouargla). Approches micromorphologique, géochimique, minéralogique et organisation spatiale*. Thèse Doct., Inst. National Agronomique, Paris-Grignon, p 283.

Heuvelink, E. (éd.) (2005). *Tomatoes*. Cambridge: CABI Publishing, 339 pages.

ITCMI (2022). *Fiches techniques valorisées des cultures maraîchères et Industrielles*. Institut Technique Des Cultures Maraichères et Industrielles, Algérie 5p.

Jones Jr, J. B. (2007). *Tomato plant culture: in the field, greenhouse, and home garden*. CRC press.

Kheir, A. M., Govind, A., Zoghdan, M. G., Khalifa, T. H., Aboelsoud, H. M., & Shabana, M. M. (2023). *The Fusion Impact of Compost, Biochar, and Polymer on Sandy Soil Properties and Bean Productivity*. Agronomy, 13(10), 2544.

Laurin-Lancôt, S. (2015). *Effet de l'amendement en biochar des sols biologiques pour une culture de tomates sous serre : rétention en nutriments, activité biologique et régie de fertilisation* (Mémoire de maîtrise, Université Laval).

Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). *Biochar for environmental management : an introduction*. In *Biochar for environmental management* (pp. 1-13). Routledge

Masmoudi, A., Chergui, Y. (2016, avril). *Maîtrise de la salinité sous irrigation goutte à goutte sur une culture de tomate sous serre*. Communication présentée au Workshop international « Gestion Intégrée et Durable des Territoires Oasiens », Zagora, Maroc.

Nesson, C., 1978. *L'évolution des ressources hydrauliques dans les oasis du Bas Sahara algérien*. In: *Recherche sur l'Algérie*. Ed. CNRS, Paris, p. 7-100.

Ngaram, N. (2011). *Contribution à l'étude analytique des polluants (en particulier de type métaux lourds) dans les eaux du fleuve Chari lors de sa traversée de la ville de N'Djamena* [Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1 & Université de N'Djamena]. HAL,p.108.

- ONM, 2020. *Bulletin climatologique de la station d'Ouargla*. Service archives. Ouargla, Algérie
- Ozenda, P., 1991. *Flore du Sahara*, 3ème Edition. CNRS, Paris, p 662.
- Peet, M. M., & Welles, G. (2005). *Greenhouse tomato production*. In *Tomatoes* (pp. 257-304). Wallingford UK: CABI Publishing.
- Peng, S., Garcia, F. V., Laza, R. C., & Cassman, K. G. (1993). *Adjustment for specific leaf weight improves chlorophyll meter's estimate of rice leaf nitrogen concentration*. *Agronomy Journal*, 85(5), 987-990
- Poojitha, M. (2023). *Tomato Grading: A New Approach for Classifying and Predicting Tomato Quality based on Visual Features*. *Journal of Advanced Zoology*, 44.
- Ruelland, E., Vaultier, M. N., Zachowski, A., & Hurry, V. (2009). *Cold signalling and cold acclimation in plants*. *Advances in botanical research*, 49, 35-150.
- Sattar, S., Iqbal, A., Parveen, A., Fatima, E., Samdani, A., Fatima, H., & Shahzad, M. (2024). *Tomatoes Unveiled: A Comprehensive Exploration from Cultivation to Culinary and Nutritional Significance*. Qeios.
- Shamshiri, R. R., Jones, J. W., Thorp, K. R., Ahmad, D., Man, H. C., & Taheri, S. (2018). *Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: a review*. *International agrophysics*, 32(2), 287-302.
- Slimani, R., 2016. *Étude qualitative des ressources en eaux souterraines et cartographie de la vulnérabilité environnement d'un aquifère au climat aride méditerranéen : cas de la cuvette de Ouargla, Algérie*. Thèse .Université kasdi merbah-Ouargla, p8-26-27.
- Thiaw, W. (2017). *Comparaison de différentes fertilisations organiques sur la culture de tomate dans les Niayes* (Doctoral dissertation, UCAD).
- Toutain, G., 1979. *Eléments d'agronomie saharienne, de la recherche au développement*. Ed .INRA, Paris, p 276.
- Uddling, J., Gelang-Alfredsson, J., Piikki, K., & Pleijel, H. (2007). *Evaluating the relationship between leaf chlorophyll concentration and SPAD-502 chlorophyll meter readings*. *Photosynthesis research*, 91, 37-46.
- Z. Xu, N. Pehlivan, A. Ghorbani, C. Wu, *Effects of azorhizobium caulinodans and piriformospora indica Co-inoculation on growth and fruit quality of tomato (Solanum lycopersicum L.) under salt stress Horticulturae*, 8 (2022), p. 302, [10.3390/horticulturae8040302](https://doi.org/10.3390/horticulturae8040302)