

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبو بكر بلقايد- تلمسان

Université ABOUBEKR BELKAID – TLEMCEN

كلية علوم الطبيعة والحياة، وعلوم الأرض والكون

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, et Sciences de la Terre et de l'Univers

Département d'Agronomie



Présenté par

Belhadri Sofiane

Yazid Mohamed El Amine

En vue de l'obtention du

Diplôme Master en : sciences agronomiques

Option : production végétale

**Contribution des tensiomètres à la performance de l'irrigation d'un verger
d'oranger**

Soutenu le 2025, devant le jury composé de:

| | | |
|--------------|---|-----------------------|
| Président | Pr. Tefiani Choukri | Université de Tlemcen |
| Encadrants | Dr. Baghli Merabet Naoual Dr. KAZI Tani Lotfi Mustapha | Université de Tlemcen |
| Examinatrice | Dr. Lekhal Sarra | Université de Tlemcen |

Année universitaire 2024/2025

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude à Madame BAGHLI MERABET Naoual, notre encadrante, pour son accompagnement, sa disponibilité, ses précieux conseils et son soutien tout au long de la réalisation de ce travail.

Nos sincères remerciements vont également à notre co-encadrant, Monsieur KAZI TANI Lotfi Mustapha, pour ses orientations pertinentes et son suivi attentif qui ont grandement contribué à la réussite de ce mémoire.

Nous souhaitons exprimer notre reconnaissance à Dr. BELHADRI Yassine pour ses conseils avisés et ses idées constructives qui nous ont été d'une grande aide dans l'avancement de ce projet.

Nous adressons également nos remerciements à M. Abdelkader (Producteur 1) et M. Salim(producteur 2) , producteurs d'agrumes, pour leur disponibilité et leur coopération lors de la collecte des données sur le terrain.

Nos remerciements vont aussi à l'Université Abou Bakr Belkaïd – Tlemcen, pour le cadre académique et les moyens mis à notre disposition tout au long de notre parcours.

Enfin, nous exprimons notre profonde gratitude à nos familles respectives pour leur soutien moral et matériel, ainsi qu'à tous nos camarades et amis pour leurs encouragements constants.

Nous remercions également toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation et à la réussite de ce travail.

ملخص

تُعَدّ الزراعة في الجزائر، التي تتميز بمناخ شبه جاف إلى جاف، من القطاعات التي تواجه ضغطًا متزايدًا على مواردها المائية، مما يجعلها في تحدٍ كبير لتلبية حاجتها المتزايدة للمياه، خصوصًا في المحاصيل الإستراتيجية مثل الحمضيات.

يركز هذا البحث على مقارنة طريقتين للسقي في بستان للحمضيات بمنطقة الحناية (تلمسان)، وهما: السقي التقليدي والسقي المعتمد على أجهزة التنسييمتر، وذلك من خلال دراسة تجريبية لتأثير كل طريقة على استهلاك المياه، والنمو، والإنتاج.

أظهرت النتائج أن استخدام التنسييمتر يحقق وفرةً كبيرًا في استهلاك المياه، مع الحفاظ على إنتاجية الأشجار أو تحسينها. كما يقترح البحث حلولاً عملية لتبني تقنيات سقي مستدامة تتكيف مع الظروف المحلية، وتدعم الأمان المائي والغذائي.

الكلمات المفتاحية: السقي، التنسييمتر، الحمضيات، الحناية، الجزائر، الاقتصاد في الماء.

Résumé

L'Algérie, au climat aride à semi-aride, subit une pression croissante sur ses ressources hydriques, surtout agricoles. Les agrumes, cultures stratégiques, exigent beaucoup d'eau, compliquant l'irrigation. Ce mémoire compare deux méthodes d'irrigation dans un verger d'orangers à Hennaya (Tlemcen) : l'irrigation traditionnelle et celle pilotée par tensiométrie. L'étude expérimentale évalue leur impact sur la consommation d'eau, la croissance et le rendement.

Les résultats montrent que la tensiométrie permet d'importantes économies d'eau tout en maintenant ou améliorant la productivité. Ce travail propose des recommandations pour des techniques d'irrigation durables adaptées aux conditions locales.

Mots clés : irrigation, tensiomètre, agrumes, Hennaya, Algérie, économie d'eau.

Abstract

Algeria, with its arid to semi-arid climate, faces growing pressure on water resources, especially in agriculture. Citrus fruits are strategic crops but require high water use, complicating irrigation.

This study compares two irrigation methods in an orange orchard in Hennaya (Tlemcen) : traditional irrigation and tensiometer-based irrigation. The experiment assesses their effects on water use, vegetative growth, and fruit yield.

Results show that tensiometers achieve major water savings while maintaining or improving productivity. The study offers practical guidance for sustainable irrigation adapted to local conditions, supporting national water and food security.

Keywords : irrigation, tensiometer, citrus, Hennaya, Algeria, water saving.

Table de matières

| | |
|---|----|
| Introduction générale | 1 |
| CHAPITRE I : IRRIGATION | |
| I.1. Définition | 4 |
| I.2. Historique | 4 |
| I.3. Techniques d'irrigation | 4 |
| I.4. L'eau en irrigation | 5 |
| I.5. Le poids de l'irrigation et son impact | 6 |
| I.6. Défis et perspectives d'avenir | 7 |
| I.6.1. En Afrique | 7 |
| I.6.2. En Algérie | 8 |
| CHAPITRE II : LES AGRUMES | |
| II.1. Origine des agrumes | 12 |
| II.2. Historique et répartition des agrumes | 12 |
| II.2.1. Dans le monde | 12 |
| II.2.2. En Algérie | 13 |
| II.3. Classification et caractéristiques | 13 |
| II.3.1. Classification botanique | 13 |
| II.3.2. Principales espèces cultivées | 14 |
| II.3.3. Morphologie et physiologie | 15 |
| a. Tronc | 15 |
| b. Feuilles | 15 |
| c. Fleurs | 15 |
| d. Fruits | 16 |
| e. Écorce | 16 |
| f. Pulpe | 16 |
| g. Pépins | 16 |
| h. Racines | 17 |
| II.4. Culture et entretien des agrumes | 17 |
| II.4.1. Travail du sol | 18 |
| II.4.2. Irrigation des agrumes | 18 |
| II.4.2.1. Irrigation de surface | 18 |
| II.4.2.2. Irrigation par aspersion | 19 |
| II.4.2.3. Micro-irrigation | 19 |
| II.4.2.4. Périodes critiques | 20 |
| II.4.2.5. Besoins en eau des agrumes | 20 |
| II.4.2.6. Stress hydrique..... | 21 |
| a. Manque d'eau | 21 |

| | |
|--|----|
| b. Sur-irrigation | 22 |
| II.4.2.7. Réponse des agrumes à l'irrigation | 22 |
| II.4.2.8. Effets sur racines & fruits | 23 |
| II.4.3. Taille des agrumes | 23 |
| II.4.3.1. Importance | 23 |
| II.4.3.2. Principes généraux | 24 |
| II.4.3.3. Périodes recommandées | 24 |
| II.4.3.4. Techniques | 24 |
| II.4.3.5. Spécificités variétales | 25 |
| II.4.3.6. Porte-greffes | 25 |
| 1. Histoire & évolution | 25 |
| 2. Rôle & importance | 25 |
| 3. Principaux porte-greffes | 26 |
| 4. Multiplication | 26 |
| II.4.4. Fertilisation | 26 |
| II.4.4.1. Besoins annuels | 27 |
| II.4.4.2. Programme des arbres adultes | 27 |
| II.4.4.3. Méthodes d'application | 27 |
| II.4.4.4. Fertilisation foliaire | 28 |
| 1. Définition & principe | 28 |
| 2. Techniques & précautions | 28 |
| . Avantages | 28 |
| II.4.5. Protection phytosanitaire | 30 |
| II.4.5.1. Maladies | 30 |
| II.4.5.2. Ravageurs | 33 |
| II.5. Importance économique | 37 |
| II.5.1. En Algérie | 37 |
| II.5.2. À Tlemcen | 38 |
| II.6. Défis et contraintes | 38 |
| CHAPITRE III : LE TENSIOMÈTRE | |
| III.1. Définition | 40 |
| III.2. Utilisation | 40 |
| III.3. Principe | 40 |
| III.4. Composition | 41 |
| III.5. Potentiel hydrique | 42 |
| III.6. Positionnement des sondes | 42 |
| III.7. Profondeur des sondes | 43 |
| III.8. Installation | 44 |
| III.8.1. Préparation des sondes | 44 |
| III.8.2. Installation des sondes | 44 |
| III.9. Lecture et seuils d'irrigation | 45 |
| III.9.1. Principe de lecture | 45 |
| III.9.2. Seuils recommandés | 45 |
| III.9.3. Considérations spécifiques | 45 |

| | |
|---|----|
| III.10. Utilisation des tensiomètres pour ajuster l'irrigation | 45 |
| III.11. Avantages et inconvénients | 46 |
| III.11.1. Avantages | 46 |
| III.11.2. Inconvénients | 47 |
| CHAPITRE IV : DES TENSIONNÈTRES À LA PERFORMANCE DE L'IRRIGATION D'UN VERGER D'ORANGER | |
| IV.1. Description de la région | 49 |
| IV.2. Caractéristiques climatiques | 49 |
| IV.2.1. Paramètres de Hennaya | 48 |
| IV.2.1.1. Température | 50 |
| IV.2.1.2. Précipitations | 50 |
| IV.3. Suivi de l'humidité du sol chez 2 producteurs | 50 |
| IV.2.1.3. Influence des températures et des précipitations sur la production d'agrumes à Hennaya..... | 51 |
| IV.3.1. Producteur 1 | 51 |
| 1. Description du site | 51 |
| 2. Opérations d'entretien | 52 |
| 2.1. Traitement d'hiver | 50 |
| 2.2. Taille | 52 |
| 2.3. Travail du sol | 52 |
| 2.4. Phytosanitaires | 53 |
| 2.5. Fertilisation | 53 |
| 3. Utilisation des tensiomètres | 54 |
| 3.1. Installation | 54 |
| 3.2. Suivi | 55 |
| 3.3. Analyse | 56 |
| 3.4. Observations | 57 |
| 4. Limitations | 57 |
| 4.1. Irrigation | 57 |
| 4.2. Ravageurs | 58 |
| 4.3. Feuillage – jaunissement | 59 |
| 4.4. Chute physiologique | 50 |
| 4.5. Maladies fongiques | 61 |
| 5. Contraintes rencontrées | 61 |
| 5.1. Stress hydrique prolongé | 61 |
| 5.2. Chute des fleurs | 62 |
| 5.3. Déséquilibre hydrique | 62 |
| 6. Conséquences | 63 |
| 7. Rôle du tensiomètre | 63 |
| 8. Impact du stress hydrique | 64 |
| IV.3.2. Producteur 2 | 64 |
| 1. Description du site | 64 |
| 2. Opérations d'entretien | 64 |
| 2.1. Travail du sol | 64 |

| | |
|---|-----------|
| 2.2. Fertilisation & traitements | 64 |
| 2.2.1. Fertilisation | 64 |
| 2.2.2. Traitements phytosanitaires | 66 |
| 3. Irrigation & tensiométrie | 66 |
| 4. Limitations techniques et agronomiques chez le producteur 2 | 68 |
| 4.1. Irrigation | 68 |
| 4.2. Symptômes physiologiques | 69 |
| 4.3. Absence de brise-vent | 69 |
| 4.4. Salinité de l'eau | 70 |
| 4.5. État sanitaire | 70 |
| 5. Reprise de vigueur | 70 |
| 6. Résultat sur le rendement à Hennaya | 71 |
| 7. Comparaison du système de production | 71 |
| CHAPITRE V : UTILISATION DU TENSIOMÈTRE ET OPTIMISATION DES PRATIQUES D'IRRIGATION | |
| V.1. Introduction | 75 |
| V.2. Instructions pour éviter les erreurs | 75 |
| V.3. Apport du tensiomètre en contexte aride | 76 |
| Conclusion | 79 |
| Références bibliographiques | 81 |

Liste des abréviations

- **ARTE-MIS** : Acquisition de Références Technico–Économiques sur les Matériels d'Irrigation de Surface
- **Cbars** : Centibars
- **CEMAGREF** : Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et forêts
- **CIRAD** : Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
- **DB-CITY** : Base de données sur les villes
- **DDAF** : Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt
- **FAO** : Food and Agriculture Organization
- **GA3** : Acide gibbérellique
- **GIRE** : Gestion Intégrée des Ressources en Eau
- **Ha** : Hectare
- **HLB** : Huanglongbing (Maladie du Dragon Jaune ou Greening)
- **INRAE** : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement
- **ITAFV** : Institut Technique de l'Arboriculture Fruitière et de la Vigne
- **kWh** : Kilowatt-heure
- **km³** : Kilomètre cube
- **MAPAQ** : Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
- **OECD** : Organisation for Economic Co-operation and Development
- **RFU** : Réserve Facilement Utilisable
- **RU** : Réserve Utile
- **Spp.** : Espèces (abréviation scientifique latine)
- **WWF** : World Wide Fund for Nature
- **CTV- Citrus Tristeza Virus** : Virus de la Tristeza des agrumes.

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Répartition mondiale de la consommation d'eau douce par secteur (2011)..... | 6 |
| Figure 2 : Assèchement de la mer d'Aral en Asie centrale (2000)..... | 7 |
| Figure 3 : Diffusion des agrumes dans le monde (1971) | 13 |
| Figure 4 : Fruits d'orange au moment de fructification (2004)..... | 15 |
| Figure 5 : Anatomie d'une orange (2010) | 16 |
| Figure 6 : Irrigation d'orangers par cuvettes (2012) | 19 |
| Figure 7 : Irrigation d'un oranger par aspersion (2012)..... | 19 |
| Figure 8 : Irrigation d'oranger par le système goutte à goutte (2020) | 20 |
| Figure 9 : Taille du citronnier (2024) | 24 |
| Figure 10 : Pourriture racinaire sur un oranger (2012)..... | 30 |
| Figure 11 : Symptômes de CBS sur les fruits des agrumes (2020)..... | 30 |
| Figure 12 : viroïde de l'exocortis des agrumes (2020) | 31 |
| Figure 13 : Mandarines infectées par la maladie du dragon jaune (2009) | 31 |
| Figure 14 : Crevasses du bois (stem pitting) et chutes de fruits induites par le virus de la tristezza des agrumes chez le pamplemousse Star Ruby (2020) | 32 |
| Figure 15 : Maladie du mal secco des agrumes (<i>Phoma tracheiphila</i>) (Liberato et al., 2006). | 32 |
| Figure 16 : Psylle Asiatique sur une feuille d'un agrume (2008) | 33 |
| Figure 17 : Pucerons sur une feuille d'un citronnier(2019) | 33 |
| Figure 18 : Cochenilles farineuses sur une feuille d'un agrume (2013)..... | 34 |
| Figure 19 : <i>Ceratitis capitata</i> sur une mandarine | 34 |
| Figure 20 : Galleries sur une feuille d'un agrume causées par la mineuse des agrumes | 35 |
| Figure 21 : thrips des agrumes (2020) | 35 |
| Figure 22 : Effet du pou rouge sur les branches d'un oranger (2015) | 36 |
| Figure 23 : Effets d'aleurode floconneux des agrumes sur une feuille d'un citronnier 2020) | 36 |
| Figure 24 : Un tensiomètre planté dans le sol (2024)..... | 40 |
| Figure 25 : Mesure de la charge de pression (ou de la succion) (2004)..... | 41 |
| Figure 26 : La composition d'un tensiomètre (2024) | 42 |

| | |
|--|----|
| Figure 27 : Détermination de la distance optimale des sondes par rapport au goutteur (2010) | 43 |
| Figure 28 : Températures de Hennaya (en rouge) et Tlemcen (en bleu) en 2024 (2024) | 50 |
| Figure 29 : Probabilité de précipitation quotidienne durant 2024 (2024)..... | 50 |
| Figure 30 : Pluviométrie mensuelle moyenne durant 2024 à Tlemcen (2024) | 50 |
| Figure 31: Quelques produits utilisés pour stimuler et traiter les arbres (2025) | 54 |
| Figure 32: Tensiomètres installés dans le sol (2025)..... | 54 |
| Figure 33: Représentation des dimensions d'installation des tensiomètres (2025) | 55 |
| Figure 34: Infestation d'un oranger par les pucerons (2025)..... | 59 |
| Figure 35: chute physiologique des fleurs (2025) | 60 |
| Figure 36: fusarium sur les fleurs d'un orange (photo personnelle, 2025) | 61 |
| Figure 37: représentation d'un oranger avec tensiomètre installé dans le sol et dimensions d'enfouissement (2025) | 67 |
| Figure 38: chute physiologique des fruits (2025)..... | 69 |
| Figure 39: reprise de vigueur des agrumes (2025) | 71 |

Liste des Tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1 :Récapitulatif régional du ratio des besoins d'eau et comparaison avec les ressources en eau en Afrique (2012). | 8 |
| Tableau 2:Situation de l'irrigation et pression sur les ressources en eau en Algérie en comparaison avec d'autres pays (2012) | 9 |
| Tableau 3:Conditions Optimales pour la Culture des Agrumes(2023)..... | 17 |
| Tableau 4:Effets des nutriments appliqués en fertilisation foliaire (2021) | 28 |
| Tableau 5:Informations sur Hennaya (2025) | 49 |
| Tableau 6: paramètres climatiques caractéristiques de la région de Hennaya (2025) | 49 |
| Tableau 7 :Tableau de suivi (1) | 55 |
| Tableau 8 :Tableau de suivi (2) | 68 |

Introduction générale

L'Algérie, pays au climat largement aride à semi-aride, est confronté à des défis croissants en matière de gestion de l'eau, notamment pour l'irrigation agricole. Dans ce contexte, la mise en œuvre d'une gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) est devenue indispensable pour garantir la durabilité de l'agriculture nationale. A cet effet, en 1996 le territoire algérien a été structuré en cinq grands bassins hydrographiques regroupant 19 bassins versants afin de promouvoir la GIRE. Le volume des ressources en eau renouvelables internes ont été estimées à environ 9,8 km³ par an (FAO, 2022).

Cependant, l'irrégularité des précipitations et la fréquence des épisodes de sécheresse compliquent cette gestion, en particulier pour l'agriculture et plus particulièrement les cultures gourmandes en eau comme les agrumes, qui représentent une filière stratégique pour l'économie du pays. En effet, si l'irrigation est essentielle à la productivité agricole, elle reste souvent inefficace, car les méthodes traditionnelles pratiquées ne répondent pas toujours aux besoins réels des plantes. Ce décalage entraîne un gaspillage important de l'eau et nuit au développement des arbres ainsi qu'au rendement des productions (FAO, 2017).

Dans ce contexte, améliorer l'efficacité de l'irrigation devient une priorité stratégique. Cela permettrait non seulement de renforcer la sécurité hydrique, mais aussi de contribuer à la sécurité alimentaire. Pourtant, en Afrique, l'irrigation gravitaire — peu efficiente — domine encore, couvrant près de 90 % des terres irriguées. Des techniques plus modernes et économes en eau existent, mais leur adoption reste limitée. Plusieurs freins sont en cause : faible sensibilisation des agriculteurs, coûts initiaux élevés, ou encore accès restreint aux équipements (FAO, 2019).

En Algérie, où la gestion de l'eau est un enjeu crucial, il devient impératif de promouvoir des pratiques d'irrigation plus efficaces et durables. En ce sens, la loi Algérienne n° 05-12 sur l'eau pose les fondements d'une utilisation et d'une gestion durable des ressources hydriques, tout en encadrant leur développement (FAO, 2005).

Ce mémoire s'inscrit dans cette dynamique. Il vise à comparer, sur une base expérimentale, deux méthodes d'irrigation appliquées à la culture des agrumes dans un périmètre irrigué situé à Hennaya à Tlemcen (Algérie). Il s'agit de l'irrigation traditionnelle et l'irrigation pilotée par tensiométrie. L'objectif principal est d'évaluer l'impact de chacune sur la consommation en eau, la croissance des arbres et le rendement en fruits. À travers des expérimentations de terrain et une analyse approfondie des données, ce travail cherche à montrer qu'une amélioration des techniques d'irrigation peut constituer une avancée majeure vers une agriculture plus résiliente et durable face aux défis climatiques et hydriques. Des recommandations concrètes seront

proposées afin de favoriser l'adoption de pratiques agricoles mieux adaptées aux contraintes environnementales locales actuelles.

Pour cela, le chapitre I présentera l'irrigation et soulignera l'importance de l'eau dans ce processus, en abordant ses principes fondamentaux et son rôle essentiel dans le développement des cultures. Le chapitre II sera consacré aux agrumes, retraçant leur histoire, leurs caractéristiques botaniques, leurs exigences culturales ainsi que leur importance économique et agricole. Le chapitre III portera sur le tensiomètre, en détaillant son fonctionnement, son rôle dans la gestion de l'irrigation et les paramètres influençant ses mesures. Le chapitre IV présentera notre étude expérimentale, qui consiste à comparer l'efficacité de l'irrigation chez deux producteurs d'agrumes à Hennaya à l'aide de la tensiométrie. Enfin, le chapitre V traitera de la bonne utilisation du tensiomètre, de ses limites et de son importance pour une gestion rationnelle et durable de l'eau d'irrigation.

CHAPITRE I: IRRIGATION

I.1. Définition

L'irrigation désigne l'apport contrôlé d'eau à une parcelle agricole dans le but de compenser l'irrégularité des précipitations naturelles. Elle permet de sécuriser la croissance des cultures en garantissant un accès régulier à l'eau, élément vital au développement végétal. (Géoconfluences, 2024).

I.2. Historique

Les premières formes d'irrigation remontent à plus de 6000 ans. En Mésopotamie, les Sumériens utilisaient dès 3000 av. J.-C. un réseau de canaux pour détourner les eaux du Tigre et de l'Euphrate vers leurs champs, permettant ainsi de cultiver des terres arides. Cette gestion de l'eau a été l'un des fondements du développement agricole dans la région mésopotamienne.

En Égypte antique, dès 2900 av. J.-C., les crues du Nil étaient utilisées à travers un système sophistiqué de bassins et de canaux. Le lac Moeris, par exemple, servait à réguler les eaux pour l'irrigation et facilitait également des projets d'infrastructure majeurs. Ce système assurait la fertilité annuelle des sols le long du fleuve.

(Postel, 1999)

En Chine, le système d'irrigation de Dujiangyan, construit au III^e siècle av. J.-C. dans la province du Sichuan, est toujours opérationnel aujourd'hui. Il permettait de contrôler les inondations tout en irriguant efficacement de vastes zones agricoles, sans nécessiter de barrages.

(Needham, 1986)

À Oman, les systèmes d'irrigation appelés aflaj, en usage depuis environ 2500 av. J.-C., reposent sur la distribution d'eau par gravité à partir de sources souterraines. Ce système communautaire ingénieux est toujours utilisé et reconnu comme patrimoine mondial par l'UNESCO. (UNESCO, 2006)

1.3. Techniques d'irrigation

L'irrigation gravitaire, ou irrigation de surface, est la méthode la plus ancienne et reste la plus courante dans le monde. Traditionnellement, l'eau est distribuée par des canaux en terre, avec des ouvertures permettant à l'eau de s'écouler dans les champs. Cependant, cette méthode entraîne des pertes d'eau importantes et des arrosages inégaux. Pour améliorer l'efficacité et réduire les coûts de main-d'œuvre, des équipements mécaniques et automatiques ont été introduits, associés à des techniques modernes de nivellement des terres. Ces innovations

peuvent augmenter le rendement hydraulique de l'irrigation gravitaire de 20 à 30% (Berthomé et al., 1989).

L'irrigation par aspersion a pris son essor après la Seconde Guerre mondiale, principalement en Amérique et en Europe. À l'origine, elle utilisait des rampes mobiles ou fixes avec des asperseurs. Les systèmes modernes, tels que les enrouleurs et les pivots, sont désormais plus sophistiqués, faciles à utiliser et automatisés. Ces systèmes sont plus efficaces que l'irrigation gravitaire, permettant des économies d'eau considérables et atteignant une efficacité hydraulique proche de 100%.

La micro-irrigation, ou irrigation localisée, a été initialement utilisée sous serre avant d'être appliquée en plein champ en Israël vers 1950. Cette méthode consiste à fournir de petites quantités d'eau directement à la zone racinaire des plantes à faible débit. Utilisée principalement dans les cultures pérennes et spécialisées, elle permet un contrôle précis de l'humidité du sol grâce à des capteurs et peut aussi intégrer des apports de fertilisants ou de produits phytosanitaires. Bien que très performante, cette technique reste coûteuse et peu adaptée aux grandes cultures (Decroix, 1988).

I.4 L'eau en irrigation

Au niveau Mondial, l'agriculture, en tant que principal consommateur d'eau douce, joue un rôle central dans la gestion des ressources hydriques mondiales (figure1). Avec environ 70 % des prélèvements d'eau attribués à l'agriculture, ce secteur exerce une pression considérable sur les ressources disponibles, notamment dans les régions arides et semi-arides où l'eau est une ressource rare et précieuse (OECD, 2021). Cette pression est accentuée par les variations régionales : en Asie du Sud, où l'agriculture est l'épine dorsale de l'économie, 91 % de l'eau douce est utilisée pour l'Irrigation, tandis qu'au Moyen-Orient et en Afrique du Nord, cette proportion atteint 85 %, exacerbant les risques de pénuries hydriques (FAO, 2020).

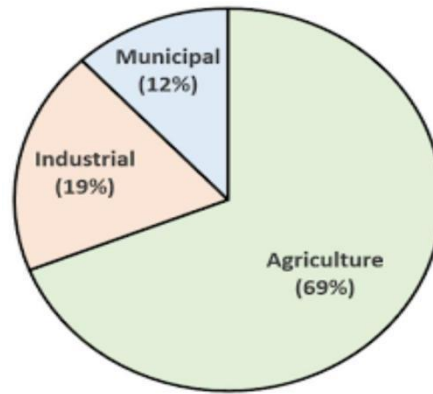


Figure 1: Répartition mondiale de la consommation d'eau douce par secteur (Cmglee, 2011)

I.5. Le poids de l'irrigation et son impact

L'agriculture irriguée est particulièrement gourmande en eau. En raison des processus d'évaporation, de transpiration des plantes et des pertes dans les réseaux d'irrigation, une grande partie de l'eau prélevée n'est pas directement absorbée par les cultures. Ce phénomène est d'autant plus préoccupant que les méthodes d'irrigation traditionnelles, comme l'irrigation par submersion, entraînent des pertes significatives en raison de l'infiltration excessive et de l'évaporation. Pour produire une tonne de céréales, entre 1 000 et 3 000 m³ d'eau sont nécessaires, tandis que la culture du riz, aliment de base pour une grande partie de la population mondiale, peut exiger jusqu'à 3 tonnes d'eau par kilogramme produit (FAO, 2017).

Cette consommation excessive a des répercussions directes sur les ressources en eau souterraines et superficielles. Dans plusieurs régions du monde, l'exploitation excessive des nappes phréatiques a entraîné une baisse alarmante du niveau des eaux souterraines, compromettant leur disponibilité à long terme. En Inde, par exemple, l'extraction intensive pour l'irrigation a provoqué une diminution du niveau des nappes phréatiques de plusieurs mètres par an dans certaines zones agricoles (WWF, 2023). De plus, le détournement massif des cours d'eau pour l'agriculture a contribué à l'assèchement de certains lacs et rivières, comme la mer d'Aral en Asie centrale, autrefois l'un des plus grands lacs du monde, qui a perdu plus de 90 % de sa superficie (figure 2) en raison des prélèvements excessifs pour l'irrigation du coton et d'autres cultures. (National Geographic France, 2014).



Figure 2 : Assèchement de la mer d’Aral en Asie centrale (2000 vs 2014)-(NASA Earth Observatory, 2000)

I.6. Défis et perspectives d’avenir

Face à la surconsommation des ressources en eau, la nécessité de repenser la gestion de l’eau agricole est primordiale. La FAO prévoit une augmentation de 50 % de la demande en eau pour l’agriculture d’ici 2050, sous l’effet de la croissance démographique et de l’évolution des régimes alimentaires (FAO, 2020). Cette situation impose d’adopter des pratiques agricoles plus durables et efficaces en matière d’eau.

Parmi les solutions envisageables, l’optimisation des techniques d’irrigation, comme l’irrigation au goutte-à-goutte et l’irrigation localisée, permet de réduire considérablement le gaspillage. Ces méthodes, bien que plus coûteuses à mettre en place, améliorent l’efficacité de l’eau en ciblant directement les racines des plantes et en minimisant l’évaporation. De plus, l’adoption de cultures plus résistantes à la sécheresse et de pratiques agricoles basées sur l’agroécologie peut contribuer à limiter la dépendance excessive aux ressources en eau.

I.6.1. En Afrique

Malgré un fort potentiel en ressources en eau renouvelables, l’Afrique utilise peu d’eau pour l’irrigation, sauf en Afrique du Nord où la pression sur les ressources atteint 76,8 %, contre seulement 1,7 % en Afrique subsaharienne. Cette disparité montre un retard important dans l’exploitation des ressources disponibles, freinant l’augmentation des rendements agricoles.(Tableau 1)

L’agriculture africaine repose historiquement sur les cultures pluviales, avec une expansion des surfaces cultivées pour répondre à la demande vivrière. Cependant, la raréfaction des terres fertiles oblige à améliorer les rendements. Pour suivre la croissance démographique sans

dépendre des importations, une hausse de la production de 4 % par an est nécessaire. L'irrigation est une solution clé, notamment pour les cultures horticoles et céréalières. L'Afrique possède un potentiel important pour l'irrigation, mais son exploitation varie selon les régions. Le développement de l'irrigation est freiné par des contraintes institutionnelles, économiques et sociales. Les grands projets d'irrigation sont coûteux et nécessitent une évaluation rigoureuse. Les systèmes communautaires d'irrigation, basés sur des techniques locales comme la collecte des eaux et l'aménagement des vallées, offrent une alternative durable et adaptée aux besoins des populations (FAO, 2001).

Tableau 1 :Récapitulatif régional du ratio des besoins d'eau et comparaison avec les ressources en eau en Afrique (FAO, 2012).

| Région | Ressources en eau renouvelables (km ³ /an) | Besoin en eau d'irrigation (km ³ /an) | Ratio des besoins d'eau (%) | Prélèvement d'eau pour irrigation (km ³ /an) | Pression sur les ressources en eau due à l'irrigation (%) |
|------------------------|---|--|-----------------------------|---|---|
| Afrique | 5 530.286 | 82.611 | 48 | 171.222 | 3.1 |
| Afrique Septentrionale | 103.265 | 56.830 | 72 | 79.261 | 76.8 |
| Afrique Subsaharienne | 5 427.021 | 25.781 | 28 | 91.961 | 1.7 |
| Afrique Centrale | 2 856.900 | 0.273 | 27 | 1.000 | 0.0 |
| Afrique Orientale | 337.010 | 3.051 | 25 | 12.081 | 3.6 |
| Golfe de Guinée | 1 110.630 | 2.128 | 24 | 8.849 | 0.8 |
| Îles de l'océan Indien | 339.751 | 4.530 | 27 | 16.612 | 4.9 |
| Afrique Australe | 449.280 | 4.128 | 27 | 15.332 | 3.4 |
| Soudano-sahélienne | 433.450 | 11.671 | 31 | 38.082 | 11.4 |

I.6.2. En Algérie

En Algérie, les besoins en eau pour l'irrigation atteignent 2,511 km³/an, représentant 72 % de ses besoins en eau, avec une pression importante sur les ressources renouvelables estimée à

CHAPITRE I: IRRIGATION

30,01 % (FAO, 2012). Ce niveau élevé souligne la priorité donnée à l'irrigation face à la rareté des précipitations, dans un contexte de stress hydrique aggravé où le pays prélève plus que ses ressources renouvelables (tableau 2).

Face à sa forte dépendance aux importations alimentaires, l'Etat Algérien a lancé un plan national en 2000, suivi en 2009 d'une politique de renouvellement agricole et de développement rural. L'irrigation est une priorité en raison de la variabilité des précipitations. En 2014, 14,5 % des terres cultivées étaient irriguées, soit 569 418 ha. Le pays souffre de stress hydrique avec seulement 293 m³ d'eau par habitant et par an. Ses ressources renouvelables s'élèvent à 11 670 millions de m³/an, mais il prélève 8 425 millions de m³, soit plus que le volume renouvelable, dont 4 800 millions de m³ d'eaux de surface et 3 000 millions de m³ d'eaux souterraines. L'eau dessalée (615 millions de m³) et les eaux usées traitées (10 millions de m³) restent marginales. Avec des infrastructures de stockage anciennes et une évapotranspiration élevée (de 800 mm au nord à 2 200 mm au sud), l'Etat algérien est en voie d'améliorer l'efficacité de l'irrigation et de développer la réutilisation des eaux usées pour faire face à la pénurie d'eau (FAO, 2025).

Tableau 2: Situation de l'irrigation et pression sur les ressources en eau en Algérie en comparaison avec d'autres pays (FAO, 2012)

| Pays | Ressources en eau renouvelables (km ³ /an) | Année | Besoin en eau d'irrigation (km ³ /an) | Ratio des besoins d'eau (%) | Prélèvement d'eau pour irrigation (km ³ /an) | Pression sur les ressources en eau due à l'irrigation (%) |
|----------------|---|-------|--|-----------------------------|---|---|
| Afghanistan | 65.000 | 2002 | 10.901 | 55 | 20.000 | 30.77 |
| Afrique du Sud | 50.000 | 2000 | 2.138 | 27 | 7.836 | 15.67 |
| Albanie | 41.700 | 2000 | 0.322 | 62 | 0.518 | 1.24 |
| Algérie | 11.670 | 2001 | 2.511 | 72 | 3.502 | 30.01 |
| Allemagne | 154.000 | 2006 | 0.048 | 60 | 0.080 | 0.05 |
| Angola | 148.000 | 2005 | 0.040 | 27 | 0.147 | 0.10 |

CHAPITRE I: IRRIGATION

| | | | | | | |
|------------------------|-------|------|-------|----|-------|------|
| Antigua-et- Barbuda | 0.052 | 1997 | 0.000 | 25 | 0.001 | 2.52 |
|------------------------|-------|------|-------|----|-------|------|

En Algérie, les besoins en irrigation s'élèvent à 2,511 km³/an, ce qui correspond à une pression de 30 % sur les ressources en eau renouvelables. Ce niveau, comparable à celui observé en Afghanistan (30,77 %), demeure nettement supérieur à celui de pays comme l'Afrique du Sud (15,67 %) ou l'Albanie (1,24 %). Ces données révèlent la forte dépendance de l'agriculture Algérienne à l'irrigation et la vulnérabilité des ressources hydriques nationales.

CHAPITRE II: LES AGRUMES

II.1. Origine des Agrumes

Les agrumes, membres de la famille des Rutacées, sont originaires d'Asie du Sud-Est, avec des centres de diversité identifiés dans les régions tropicales et subtropicales de la Chine, de l'Inde et de l'archipel Malais (Spiegel-Roy et al, 1996).

Ces zones, caractérisées par des climats chauds et humides, ont favorisé l'émergence et la diversification des agrumes (Klorane Botanical Foundation, 2023). Les espèces du genre *Citrus* proviennent principalement d'une zone s'étendant de l'Inde à l'Indonésie, tandis que *Poncirus* et *Fortunella* sont originaires des régions septentrionales de la Chine orientale(Luro et al.,2022).

Les principales espèces ancestrales identifiées comprennent :

- Le cédratier (*Citrus medica*) : Originaire de l'Inde orientale, il a été introduit en Chine il y a plusieurs siècles (Chevalier, 1943)
- Le mandarinier (*Citrus reticulata*) : Cultivé depuis l'Antiquité en Chine, il a été introduit dans le bassin méditerranéen au début du XIXe siècle.
- Le pamplemoussier (*Citrus maxima*) est originaire du sud-est asiatique, notamment des archipels de Malaisie et d'Indonésie. Il a été introduit dans le sud de l'Asie continentale il y a environ 100 ans avant notre ère (Morton, 1987).

II.2. Historique et Répartition des Agrumes

II.2.1. Dans le monde

La diffusion des agrumes à travers le monde s'est effectuée progressivement. Le cédratier (*Citrus medica*) fut la première espèce introduite en Europe, vers 300 av. J.-C. (Scora, 1975). Le bigaradier (*Citrus aurantium*), le citronnier (*Citrus limon*) et l'oranger (*Citrus sinensis*) furent introduits dans le bassin méditerranéen au XIIe siècle, tandis que le mandarinier (*Citrus reticulata*) y fit son apparition au XIXe siècle. Aujourd'hui, cette région est une zone clé pour la production d'agrumes.(figure 3)

L'introduction des agrumes en Afrique de l'Est au XIVE siècle est attribuée aux échanges commerciaux entre Arabes et Indiens. Plus tard, les explorateurs portugais ont contribué à leur diffusion vers le bassin du Congo (Gmitter et Hu, 1990).

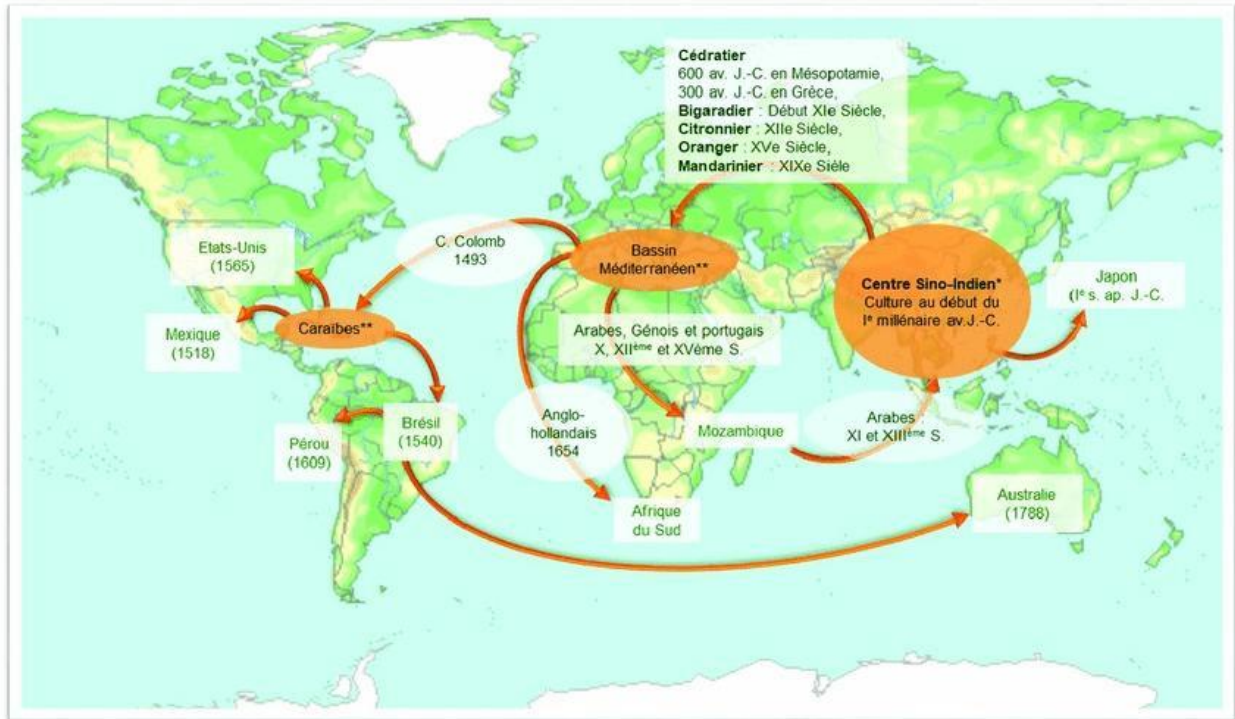


Figure 3: Diffusion des agrumes dans le monde (Praloran, 1971)

III.2.2. En Algérie

L'année 1850 marque un tournant dans l'histoire des agrumes en Algérie, avec l'introduction du mandarinier, rapidement adopté malgré certaines incertitudes concernant son écoulement commercial. Cette même période voit également le début des exportations d'oranges vers l'Europe. (Messer, 2002).

II.3. Classification et Caractéristiques des Agrumes

II.3.1. Classification botanique

- Les agrumes, appartenant à la famille des Rutacées, se répartissent en trois genres principaux : *Citrus*, qui regroupe la majorité des espèces cultivées pour leurs fruits et huiles essentielles ; *Fortunella*, comprenant les kumquats, de petits agrumes comestibles ; et *Poncirus*, incluant *Poncirus trifoliata*, utilisé comme porte-greffe résistant au froid (Bausher et al., 2006).

Deux classifications principales sont utilisées pour les agrumes :

- Classification de Tanaka :
Identifie 156 espèces distinctes sur la base de critères morphologiques détaillés ,
approche plus large et plus descriptive.
- Classification de Swingle:
Reconnaît 16 espèces principales, simplifiant l'organisation du genre Citrus , c'est la
Classification la plus utilisée aujourd'hui (Maison des Agrumes. 2011).

II.3.2 Principales espèces cultivées

Selon la classification de Swingle, huit espèces sont principalement cultivées :

1. *Citrus sinensis* – oranger
2. *Citrus aurantium* – bigaradier
3. *Citrus reticulata* – mandarinier
4. *Citrus paradisi* – pomelo
5. *Citrus maxima* – pamplemoussier
6. *Citrus limon* – citronnier
7. *Citrus aurantifolia* – limettier
8. *Citrus medica* – cédratier

Chaque espèce comprend de nombreuses variétés appelées cultivars (Klorane Botanical Foundation. 2008).

À l'échelle mondiale, les agrumes cultivés dérivent principalement de trois espèces ancestrales : *Citrus reticulata* (mandarinier), *Citrus maxima* (pamplemoussier) et *Citrus medica* (cédratier) (CIRAD, 2018).

II.3.3. Morphologie et physiologie (cassan, 2008)

a. Tronc

Le tronc des agrumes est robuste et relativement court. Il présente souvent un port harmonieux et arrondi. La croissance rapide de l'arbre permet d'obtenir une structure ramifiée dense.

b. Feuilles

Les feuilles des agrumes sont persistantes, alternes et coriaces. Elles sont souvent ovales, vert foncé et dotées d'un pétiole qui peut être ailé (notamment chez le citronnier et le pamplemoussier). Lorsqu'on les froisse, elles dégagent une odeur aromatique due aux glandes à huile essentielle.

c. Fleurs

Les fleurs sont généralement blanches et parfumées. Elles sont composées de cinq pétales et d'un grand nombre d'étamines. Certaines espèces, comme le cédratier, ont des fleurs nuancées de rose à l'extérieur. (figure 4)



Figure 4: Fruits d'orange au moment de fructification (Finch et al, 2004).

d. Fruits (Hespérides)

Les fruits des agrumes sont des baies spécialisées appelées hespérides, caractérisées par leur structure segmentée.

- **Épicarpe (Flavédo)** : Couche externe contenant des glandes à huile essentielle, responsable de la couleur et de l'arôme du fruit.
- **Mésocarpe (Albédo)** : Partie interne blanche et spongieuse, située entre le flavédo et la pulpe.
- **Endocarpe** : Partie comestible du fruit, divisée en quartiers contenant des vésicules remplies de jus.

e. Écorce

L'écorce est généralement fine et peut être lisse ou rugueuse selon l'espèce. Elle contient des poches sécrétrices d'huiles essentielles, ce qui lui confère un parfum caractéristique. Chez certaines espèces comme l'oranger amer (*Citrus aurantium*), l'écorce est ponctuée de petites glandes bien visibles.

f. Pulpe

La pulpe est formée de vésicules juteuses et acidulées, enfermées dans les quartiers du fruit. La couleur et la saveur varient selon l'espèce : elle peut être jaune, orange ou rouge (chez certains pomélos) et plus ou moins sucrée ou acide.

g. Pépins

Les pépins sont généralement de couleur blanche, ovoïdes et situés à l'intérieur des quartiers du fruit. Certaines variétés comme la clémentine sont apyrènes (sans pépins) (figure 5).

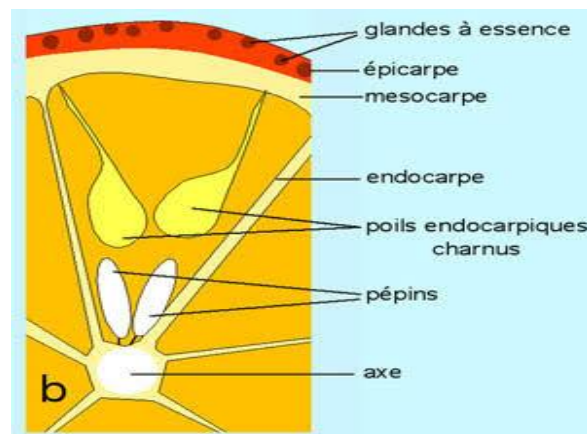


Figure 5: Anatomie d'une orange (Sorbonne Université, 2010).

h. Racines

Le système racinaire des agrumes est généralement superficiel, avec une forte densité de racines secondaires qui explorent les couches superficielles du sol. Cela les rend sensibles aux excès d'eau et aux maladies racinaires .

II.4. Culture et entretien des agrumes

Pour assurer une croissance optimale et une production de qualité, la culture des agrumes nécessite des conditions spécifiques liées à la température, l'humidité, la nature du sol, l'irrigation, l'exposition et la densité de plantation. Le Tableau 3 ci-dessous présente les principales conditions agroclimatiques et culturelles favorables au développement des agrumes, permettant d'obtenir un rendement optimal et des fruits de bonne qualité.

Tableau 3: Conditions Optimales pour la Culture des Agrumes(Curk et al, 2023)

| Facteur | Conditions Optimales |
|-----------------------|--|
| Température | Idéale entre 13°C et 38°C, avec une bonne amplitude thermique. |
| Humidité | Niveau d'humidité relative autour de 50-70% pour éviter le stress hydrique. |
| Sol | Préférence pour un sol limoneux, légèrement acide à neutre (pH 6,5-7,5). |
| Irrigation | Apport régulier, environ 1200 mm par an, avec une attention particulière en été. |
| Exposition | Ensoleillée et abritée des vents froids pour éviter le stress thermique. |
| Densité de Plantation | 5x4 mètres pour un bon développement racinaire et un rendement optimal. |

La production d'agrumes nécessite une maîtrise d'un ensemble d'opérations :

II.4.1. Le travail du sol

Le travail du sol remplit plusieurs fonctions essentielles :

- Élimination des adventices pour réduire la concurrence en eau et en nutriments.
- Amélioration de la nutrition hydrique et minérale en optimisant l'infiltration de l'eau et en réduisant les effets de la sécheresse.
- Préparation du sol pour l'irrigation et amélioration de l'enfouissement des engrais.
- Stimulation de la minéralisation de la matière organique, favorisant ainsi la disponibilité des nutriments.

➤ Méthodes et fréquence

-Traditionnellement, 5 à 4 interventions sont réalisées entre Mars et Septembre.

-Durant les autres périodes, le fauchage ou le désherbage sont privilégiés pour limiter la perturbation du sol (Fondation d'Entreprise pour la Protection et la Bonne Utilisation du Patrimoine Végétal , 2008).

II.4.2. Irrigation des agrumes

L'irrigation des agrumes joue un rôle crucial dans la productivité et la qualité des fruits. Trois principales méthodes sont utilisées :

II.4.2.1. Irrigation de surface (gravitaire)

Ce type d'arrosage est utilisé traditionnellement, il consiste à distribuer l'eau dans des cuvettes ou sillons (figure 6)

- Les doses varient entre 500 et 400 m³/ha selon le type de sol.
- La fréquence d'irrigation est de 10 à 25 jours, selon le climat et la nature du sol.
- Les pertes en eau par évaporation et percolation sont élevées.



Figure 6: Irrigation d'orangers par cuvettes (Vion et al, 2012).

II.4.2.2. Irrigation par aspersion

L'eau de l'arrosage par aspersion est projetée sous forme de pluie pour une répartition homogène. Cette méthode permet une économie d'eau allant jusqu'à 50 % par rapport à l'irrigation gravitaire. Cette méthode est sensible au vent et favorise l'évaporation, avec un risque d'encroûtement du sol. (figure 7)



Figure 7: Irrigation d'un oranger par aspersion (Zekri et al, 2012).

II.4.2.3. Micro-irrigation (goutte-à-goutte)

L'eau du système d'arrosage au goutte à goutte est directement apportée à la zone racinaire via des goutteurs ou mini-diffuseurs :

- Le nombre de goutteurs par arbre varie entre 3 et 4, en fonction de la texture du sol.

- Sur sol léger, la distance entre les goutteurs est de 0,7 à 1 m, tandis que sur sol argileux, elle peut atteindre 1,5 m.
- Le débit des goutteurs utilisés en agrumiculture varie entre 4 et 10 L/h.
- En irrigation localisée, l'évaporation du sol non couvert par le feuillage est réduite de 50 à 40 %.(figure 8)
- La fréquence d'arrosage recommandée est de 3 à 5 jours en irrigation goutte-à-goutte et de 10 à 20 jours en irrigation par cuvette (Maison des Agrumes ,2012).



Figure 8: Irrigation d'oranger par le système goutte à goutte (RIS Iberia, 2020).

II.4.2.4. Les périodes critiques pour l'irrigation des agrumes

- La floraison : période sensible au stress hydrique pouvant réduire le nombre de fleurs fécondées.
- La nouaison : moment clé pour la fixation des jeunes fruits.
- La croissance des fruits : période à besoins élevés en eau pour le développement du calibre.
- La maturation : trop d'eau à ce stade peut nuire à la qualité gustative et à la conservation. (ITAFV, 2021).

II.4.2.5. Besoins en eau des agrumes

Les besoins en eau des agrumes varient selon le climat, le type de sol et le stade de développement de l'arbre. En moyenne, un agrumier adulte nécessite entre 300 et 1 200 mm d'eau par an pour compenser les pertes par évapotranspiration. Dans les régions

méditerranéennes, les besoins se situent entre 300 et 800 mm, tandis qu'ils peuvent être réduits à 50 à 150 mm dans les zones tropicales humides, grâce à des précipitations plus régulières (Allen et al., 1998).

Les besoins en eau peuvent également être exprimés en litres par arbre. Ils dépendent du climat, du type de sol, de la réserve utile (RU) et de la réserve facilement utilisable (RFU). Par exemple, un arbre adulte peut nécessiter environ 700 litres par irrigation, avec une fréquence de six irrigations par mois, totalisant environ 4 200 litres par arbre par mois (FAO, 2012)

II.4.2.6. Le stress hydrique

Qu'il s'agisse d'un manque ou d'un excès, l'eau a des effets significatifs sur les agrumes.

a. Effets du stress hydrique dû au manque d'eau :

-Réduction de la croissance des plants :

Le stress hydrique diminue la hauteur et le diamètre des agrumes (Beniken et al., 2013).

-Diminution de la conductance stomatique :

Le stress hydrique entraîne la fermeture des stomates, réduisant l'échange gazeux et la photosynthèse (Rodriguez-Gamir et al., 2010, 2011).

-Baisse de la teneur en chlorophylle :

Le manque d'eau réduit la quantité de chlorophylle dans les feuilles, affectant la photosynthèse (Beniken et al., 2011 ; Haghghatnia et al., 2011).

-Augmentation de la concentration en sucres solubles :

Pour s'adapter au stress, les plantes accumulent des sucres solubles, un mécanisme d'ajustement osmotique (Hugo et al., 2004 ; Gomez-Cadenas et al., 1994).

-Diminution du rendement :

Une réduction de la croissance et de la photosynthèse entraîne une baisse de la productivité (Wu et al., 2008 ; Rodriguez-Gamir et al., 2010).

-Sensibilité accrue aux maladies et ravageurs

Les agrumes sous stress hydrique sont plus vulnérables aux infections et aux insectes (Castel et al., 1993).

-Modification de la transpiration et de l'évapotranspiration :

Le déficit hydrique réduit la transpiration, limitant l'apport en nutriments essentiels (Syvertsen et al., 1988 ; Tezara et al., 2002).

-Altération du développement racinaire :

Le stress hydrique peut réduire l'exploration racinaire et l'absorption d'eau (Kramer & Boyer, 1995).

-Impact variable selon le porte-greffe :

Certains porte-greffes, comme le citrange Carrizo, confèrent une meilleure tolérance à la sécheresse (Beniken et al., 2011 ; Garcia-Sanchez et al., 2004).

b. Effets du stress hydrique dû à une sur irrigation :

-Lessivage des produits phytosanitaires, ce qui peut réduire leur efficacité et causer une contamination de l'environnement.

-Accentuation de l'érosion du sol, ce qui peut dégrader la qualité du sol et nuire à la croissance des arbres.

-Médiocre répartition de l'eau, entraînant une mauvaise absorption par les racines et un gaspillage des ressources.

-Consommation d'eau élevée, due aux pertes par mauvaise répartition, évaporation, ruissellement et absence de localisation de l'irrigation. (Monney et al, 2010).

II.4.2.7. Réponse des agrumes à l'irrigation

L'eau appliquée au sol se déplace sous l'effet de la gravité et de la capillarité, sa vitesse dépendant principalement de la taille des pores du sol. Dans un sol bien drainé, l'humidité se répartit rapidement, mais sa rétention varie selon la texture : elle est rapide dans un sol grossier et plus lente dans un sol fin.

Si une couche imperméable est présente, elle limite l'infiltration de l'eau, entraînant une saturation du sol nuisible aux agrumes. Ce problème est accentué dans les sols argileux et en hiver, notamment sous une couverture de gazon. Dans les sols très calcaires et humides, la chlorose des agrumes est un risque majeur.

Contrairement aux arbres à feuilles caduques, les agrumes transpirent intensément de la fin de l'automne au début du printemps, nécessitant une irrigation adaptée. Les vergers avec plantes de couverture peuvent avoir des besoins en eau hivernaux équivalents, voire supérieurs, à ceux des vergers nus en été.(CIRAD,1951)

II.4.2.8. Effet de l'irrigation sur le développement des racines et la croissance des fruits

-Développement des racines

Les expériences n'ont pas confirmé que des irrigations fréquentes et légères empêchent le développement en profondeur des racines, sauf en cas d'excès d'humidité ou de pluviométrie insuffisante. L'irrigation par rigoles n'humidifie pas tout le sol, laissant 10 à 40 % de la masse du sol non humectée.

-Chute de Juin et effets du vent

La chute de juin concerne la perte excessive de jeunes fruits lorsque l'eau disponible est insuffisante. Une expérience menée en Californie en 1931 a montré que le manque d'irrigation augmente significativement cette chute. Ainsi, plus le sol était sec, plus la perte de fruits était importante et le rendement final réduit. Les citronniers, avec une surface foliaire plus petite, souffrent moins du vent que les orangers.

-Vitesse de grossissement des fruits

Le grossissement des fruits est lié à l'humidité du sol. Une irrigation régulière favorise leur croissance, tandis qu'un déficit hydrique entraîne un ralentissement. Une sécheresse temporaire peut affecter la taille des fruits, mais si l'irrigation est rétablie, ils peuvent retrouver un développement normal. (CIRAD, 1951)

II.4.3. La Taille des Agrumes (Curk et al, 2023)

II.4.3.1. Importance de la Taille

La taille joue un rôle fondamental dans l'entretien des agrumes. Elle permet :

- Une meilleure pénétration de la lumière et de l'air.
- Un contrôle de la croissance et de la structure de l'arbre.
- Une prévention des maladies et des attaques de ravageurs.
- Une amélioration de la qualité et de la régularité de la production.



Figure 9: Taille du citronnier (Gerbeaud, 2024).

II.4.3.2. Principes Généraux de la Taille

Chaque coupe influence la répartition de la sève et la vigueur des nouvelles pousses. Il est recommandé de commencer par les coupes majeures avant d'éclaircir les branches secondaires. Une taille excessive peut affaiblir l'arbre et provoquer une alternance de production.

II.4.3.3. Périodes Recommandées pour la Taille

Dans les zones froides, la taille se pratique après les risques de gel (mars-avril), tandis que dans les zones chaudes il faut éviter la période de floraison pour limiter le stress ; les orangers et citronniers peuvent être taillés tous les deux ans, contrairement aux clémentiniers qui exigent une taille annuelle.

II.4.3.4. Techniques de Taille

Il existe plusieurs types de tailles

1. Taille de formation :

- Structuration de l'arbre dès ses premières années.
- Sélection des branches charpentières.

2. Taille de fructification :

- Éclaircissage des branches pour favoriser la mise à fruit.
- Contrôle du développement végétatif.

3. Taille sanitaire :

- Suppression des branches mortes et malades.
- Aération pour limiter l'apparition de pathogènes.

II.4.3.5. Spécificités selon les Variétés d'agrumes

Les techniques de taille varient selon la morphologie et la physiologie de chaque variété pour optimiser la production :

- Clémentinier : Taille en boule ou en entonnoir renversé pour maximiser l'ensoleillement.
- Pomelo : Taille légère pour préserver une couverture foliaire et éviter l'enchevêtrement.
- Citronnier et Pompia : Suppression régulière des gourmands qui épuisent l'arbre.

II.4.3.6. Les Porte-Greffes des Agrumes

1. Histoire et Évolution du Greffage

En Antiquité, le greffage était déjà pratiqué en Chine et dans la région méditerranéenne plusieurs siècles avant notre ère. Aristote et Théophraste mentionnaient diverses techniques telles que les greffes en couronne, par approche, en fente et en écusson. Au Moyen Âge, l'introduction de nouvelles variétés d'agrumes en Méditerranée a probablement favorisé l'usage du greffage en Asie, bien que peu de documents historiques viennent le confirmer.

À la Renaissance, sous le règne de Louis XIV, l'engouement pour les orangers, notamment les bigaradiers, a conduit à la création de l'Orangerie de Versailles. Des ouvrages de l'époque, tels que Instructions sur les orangers et les citronniers (1485), font déjà mention du greffage.

Enfin, au XIXe siècle, la pratique du greffage s'est généralisée, notamment pour lutter contre *Phytophthora*, un pathogène propagé par le commerce maritime.

2. Rôle et Importance des Porte-Greffes

Le porte-greffe influence :

- L'adaptation au sol : résistance au calcaire, à la salinité et aux sols humides.
- La tolérance aux maladies : protection contre *Phytophthora* et le virus de la tristeza (CTV).
- La vigueur et la productivité : limitation ou stimulation de la croissance.
- L'effet sur la qualité des fruits : influence sur le calibre, la coloration et la concentration en sucre.

3. Principaux Porte-Greffes et Leurs Caracteristiques

- Bigaradier (*Citrus aurantium*) : Tolérant au calcaire et à Phytophthora, mais sensible au CTV.
- *Poncirus trifoliata* : Effet nanisant, améliore la qualité des fruits, mais intolérant aux sols calcaires.
- Citron Volkamer (*Citrus limonia*) : Vigoureux, résistant au calcaire, mais sensible à la tristeza.
- Mandarinier Cléopâtre (*Citrus reshni*) : Tolérant aux sols salins et aux maladies racinaires, mais retardant la mise à fruit.
- Hybrides de citranges (*Poncirus* × Oranger) : Bonne tolérance à Phytophthora, adaptés aux climats tempérés, mais certains sont sensibles à la salinité.

4. Multiplication des Porte-Greffes

Dans la culture des agrumes, la multiplication des porte-greffes garantit la qualité, homogénéité et résistance des plants :

- Multiplication par semis : Méthode privilégiée pour garantir une homogénéité des plants.
- Reproduction apomictique : Variétés comme *Poncirus trifoliata* permettent d'obtenir des individus génétiquement identiques au parent.
- Gestion des pépinières : Sélection rigoureuse des semis et entretien du substrat pour favoriser un bon enracinement (Curk et al, 2023).

II.4.4.Fertilisation

Il est essentiel de réaliser une analyse physico-chimique du sol afin d'évaluer sa fertilité. Lorsque des carences sont détectées, notamment en P_2O_5 et K_2O , ces éléments doivent être apportés sous forme de fertilisation de fond.

Étant donné leur faible mobilité dans le sol, il est préférable de positionner l'engrais à proximité des racines. La méthode la plus efficace consiste à les incorporer avant la plantation, lors du travail du sol en profondeur.

Les sols sont généralement pauvres en matières organiques. Pour y remédier, l'apport de fumier est recommandé à la fois comme fertilisation de fond et d'entretien. Dans ce dernier cas, il peut être remplacé par la culture d'un engrais vert. (Maison des Agrumes, 2012)

Une bonne fertilisation des agrumes repose sur une combinaison équilibrée d'engrais organiques et minéraux :

- Engrais organiques : améliorent la structure et la fertilité du sol. Ils doivent être compostés pour une meilleure assimilation.

- Engrais minéraux : apportent des nutriments essentiels aux agrumes tout au long de leur cycle. (Franquesa, M, 2020).

II.4.4.1. Besoins annuels en engrais par hectare

Les besoins en engrais des agrumes varient selon la fertilité du sol et le rendement attendu :

- Azote (N) : 120 – 200 kg/ha
- Phosphore (P_2O_5) : 30 – 45 kg/ha
- Potassium (K_2O) : 40 – 150 kg/ha (FAO, 2002)

Les besoins en éléments minéraux pour un bon rendement chez les orangers adultes se situent autour de 150–200 kg/ha pour l'azote, 40–50 kg/ha pour le potassium et 30–40 kg/ha pour le phosphore selon la richesse du sol et les rendements visés. (Ayoub et Al.,2009)

II.4.4.2. Programme de fertilisation des arbres adultes

Le programme de fertilisation des agrumes adultes se planifie selon les stades phénologiques de l'arbre :

- Fin de l'hiver (Février) : 2–3 kg d'engrais NPK 12-12-17 par arbre en épandage.
- Nouaison (Mai–Juin) : 1–2 kg d'engrais riches en azote et potassium par arbre, en évitant l'excès d'azote pour limiter la pourriture noire.
- Croissance des fruits (Juillet–Août) : 1–2 kg d'engrais par arbre pour améliorer la taille et le poids des fruits. (Ayoub et al.,2009).
- En sortie d'hiver, on recommande l'application d'un engrais complet de type NPK 12-12-17 à raison de 2 à 3 kg par arbre pour relancer la croissance végétative et préparer la floraison.

Au stade de nouaison, un apport azoté complémentaire est souhaitable, surtout si la floraison a été intense. On privilégie les formules enrichies en potassium, sans excès d'azote, pour éviter la stimulation des maladies comme la pourriture noire. (FAO, 2002).

II.4.4.3. Méthodes d'application des engrais

Fertilisation du sol par application localisée d'engrais organiques (fumier, compost) ou minéraux (N, P, K) autour de la zone racinaire, suivie d'un léger enfouissement ou arrosage. (FAO, 2002).

II.4.4.4. Fertilisation foliaire

1. Définition et principe

La fertilisation foliaire consiste à appliquer des nutriments directement sur les feuilles des plantes sous forme de solutions pulvérisées. Cette méthode permet une absorption rapide et ciblée des éléments, particulièrement efficace en cas de carence ou lorsque l'absorption racinaire est limitée. Elle complète la fertilisation du sol sans la remplacer, et doit être réalisée dans des conditions climatiques appropriées pour optimiser son efficacité (Kumar et al., 2009).

2. Techniques d'application et précautions

- Application recommandée tôt le matin ou en fin d'après-midi
- Éviter les heures chaudes de la journée et les conditions venteuses
- Pulvériser principalement le dessous des feuilles, riche en stomates.
- Ne pas appliquer avant une pluie
- Respecter les doses pour éviter les brûlures foliaires et le stress
- Maintenir le pH de la solution entre 5,5 et 7,0

3. Avantages de la fertilisation foliaire des agrumes

- Correction rapide des carences
- Réduction des pertes d'engrais
- Amélioration de la floraison, nouaison et calibre des fruits
- Maintien de la fertilisation en conditions climatiques difficiles

Tableau 4: Effets des nutriments appliqués en fertilisation foliaire (Maison des Agrumes, 2021)

| Nutriment | Période d'application / Dosage | Effets |
|-----------|--------------------------------|--------|
|-----------|--------------------------------|--------|

CHAPITRE II: LES AGRUMES

| | | |
|-------------------------------|---|--|
| Urée et acide phosphoreux | Fin décembre – début janvier Urée : 20-30 kg N/ha Acide phosphoreux : 5 litres/ha (24-28% P ₂ O ₅) | Stimule la floraison et la nouaison. Augmente le rendement en améliorant la qualité des fleurs et leur transformation en fruits. |
| Potassium foliaire | Après la floraison 8-9 kg/ha K ₂ O sous forme de nitrate de potassium ou phosphate de mono-potassium | Augmente le calibre et la qualité des fruits. Améliore la résistance aux stress climatiques et aux maladies. |
| Oligoéléments (Mn, Zn, B, Cu) | Printemps et été, pendant l'expansion des nouvelles pousses | Corrige rapidement les carences spécifiques liées aux types de sols et au pH. Améliore le développement des feuilles et des fruits. Plus efficace et économique qu'une application au sol. |
| Calcium foliaire | Stade 10 mm de diamètre du fruit Nitrate de calcium : 4% Ca(NO ₃) ₂ Chlorure de calcium : À faible dose pour éviter les brûlures foliaires | Réduit la sévérité de l'éclatement des fruits. Améliore la conservation et la fermeté des agrumes. Attention : risque de brûlures des feuilles à forte dose. |
| Fer foliaire | Non conseillé en application foliaire | Faible efficacité sur les agrumes. Risque élevé de brûlures sur les feuilles et les fruits. Alternative : Appliquer du fer sous forme de chélates dans le sol. |

II.4.5. Protection phytosanitaire

La protection des cultures d'agrumes repose sur la prévention et la lutte contre les maladies et ravageurs afin de préserver la santé des arbres et d'assurer une production optimale.

II.4.5.1. Maladies des agrumes

Dûes aux plusieurs facteurs biotiques :

Pourriture racinaire et du collet (Gommose) :

Provoquée par *Phytophthora* spp., cette maladie entraîne un affaiblissement de l'arbre, avec des lésions sur le tronc et des racines pourries.



Figure 10 : pourriture du collet sur un oranger (maison des agrumes, 2012)

***Citrus Black Spot* (Maladie de la tache noire) :**

Causée par *Phyllosticta citricarpa*, elle provoque des taches brunes sur la peau des fruits, réduisant leur valeur commerciale.



Figure 11 : Symptômes de CBS sur les fruits des agrumes (Cours national des agrumes 2020)

Maladies virales et viroïdiennes (Exocortis et Cachexie) :

Ces maladies affectent principalement les porte-greffes, causant des déformations du tronc et un nanisme de l'arbre.



Figure 12 : viroïde de l'exocortis des agrumes (Benkirane et al., 2020)

Maladie du Dragon Jaune (Huanglongbing – HLB ou Greening) :

Maladie bactérienne transmise par le psylle asiatique, entraînant une décoloration des feuilles et une chute prématurée des fruits.



Figure 13 : Mandarines infectées par la maladie du dragon jaune (USDA APHIS , 2009)

Tristeza des agrumes :

Virus provoquant un affaiblissement général de l'arbre, avec des symptômes invisibles au début mais pouvant causer la mort du plant.



Figure 14 : Crevasse du bois (stem pitting) et chutes de fruits induites par le virus de la tristeza des agrumes chez le pamplemousse Star Ruby (Zhou C. et al., 2020).

Mal Secco :

Affecte surtout les citronniers, causant le dépérissement des branches à travers des spores fongiques pénétrant par les plaies.



Figure 15 : Maladie du mal secco des agrumes (Phoma tracheiphila) (Liberato et al., 2006).

II.4.5.2. Ravageurs des agrumes

Les agrumes sont exposés à divers ravageurs menaçant leur santé et production.

1. psylle Asiatique (*Diaphorina citri*) : Vecteur du *Huanglongbing*, cet insecte se nourrit de la sève des jeunes pousses, affaiblissant les arbres.



Figure 16: psylle Asiatique sur une feuille d'un agrume (Hall, 2008)

2. Pucerons (*Aphis citricola*, *Aphis gossypii*) : Affaiblissent les pousses en aspirant la sève et transmettent des maladies virales.



Figure 17: pucerons sur une feuille d'un citronnier (maison des agrumes, 2019)

3. **Cochenille farineuse** (*Planococcus citri*) : Se fixe sur les branches et les feuilles, La 3. cochenille farineuse des agrumes suce la sève : affaiblit l'arbre et favorise la fumagine.



Figure 18:cochenilles farineuses sur une feuille d'un agrume (Jeffrey W , 2013)

4. **Mouche méditerranéenne des fruits** (*Ceratitis capitata*) : Pond ses œufs dans les fruits, provoquant leur pourrissement et leur chute.



Figure 19:ceratitis capitata sur une Mandarine (Scott Bauer, 2013)

5. Mineuse des agrumes (*Phyllocnistis citrella*) : Ses larves creusent des galeries dans les feuilles, déformant les jeunes pousses.



Figure 20:galeries sur une feuille d'un agrume causées par la mineuse des agrumes(David Paulaud)

6. Thrips des agrumes (*Scirtothrips citri*) : Endommage les fleurs et les jeunes fruits en perforant l'épiderme.



Figure 21 : Thrips des agrumes (Agriculture du Maghreb, 2020)

7. Pou rouge de Californie (*Aonidiella aurantii*) : Cochenille qui s'accroche aux fruits et aux feuilles, diminuant la qualité des récoltes.



Figure 22 :effet du pou rouge sur Les branches d'un oranger (Victor Cigarra, 2015)

8. Aleurode floconneux des agrumes (*Aleurothrixus floccosus*) : Petit insecte blanc qui suce la sève et favorise l'apparition de la fumagine.(Curk et al.,2023).



Figure 23 :effets d'aleurode floconneux des agrumes sur une feuille d'un citronnier (CIRAD , 2020)

II.5. Importance économique de l'agrumiculture

II.5.1. L'agrumiculture en Algérie

L'agrumiculture occupe une place stratégique dans le secteur agricole algérien. En 2020, la superficie cultivée en agrumes atteignait environ 65 000 hectares, répartis principalement entre les wilayas du nord du pays (Office National des Statistiques [ONS], 2021).

La plaine de la Mitidja demeure une zone de concentration majeure, contribuant à près de 45 % de la production nationale. À titre d'exemple, la wilaya de Tipaza comptait à elle seule environ 2 300 hectares d'agrumes en culture en 2019, dont près de 2 000 hectares en pleine production (ONS, 2021).

Parmi les espèces cultivées, l'orange douce reste prédominante, avec une production nationale avoisinant 1,1 million de tonnes en 2018, soit environ 1,8 % de la production mondiale .

La clémentine, introduite en Algérie au début du XXe siècle, s'est également imposée comme une variété phare, reconnue pour sa qualité gustative et sa forte demande sur les marchés nationaux et internationaux (FAO, 2020).

La production nationale a évolué positivement ces dernières années, atteignant 18 millions de quintaux en 2023/2024, contre 14 millions l'année précédente, grâce à la dynamique impulsée notamment dans les régions du sud telles qu'El Oued, El Menia et Ouargla (Radio Algérie, 2024). Entre 2010 et 2021, la production a fluctué autour de 1,5 million de tonnes (Statista, 2021).

La répartition géographique est concentrée dans le centre du pays (42 %), suivi de l'ouest (25 %), de l'est (10 %) et du sud (3 %) (Algerie Eco, 2024).

II.5.2. La culture des agrumes a Tlemcen

La région de Tlemcen constitue un pôle agrumicole majeur du pays, avec des zones de production comme Hennaya, Remchi et Maghnia. Les conditions climatiques y sont favorables et la culture des agrumes y joue un rôle économique central.

L'irrigation repose sur des systèmes performants, notamment dans le périmètre irrigué de Hennaya (750 ha), alimenté par la station de traitement des eaux usées d'Aïn-Houtz. La région utilise également les forages et les puits de pour diversifier ses ressources hydriques.

Le développement agrumicole s'accompagne de l'extension des surfaces irriguées, de la mise en place de nouveaux puits, et de la modernisation des pratiques agricoles afin d'améliorer les rendements et la qualité des fruits.

Cependant, certains défis demeurent : les épisodes de gel affectent la production, l'accès difficile aux vergers exige l'ouverture de chemins agricoles, et des infrastructures de stockage et de transformation doivent être développées pour valoriser la production locale (Le Courrier d'Algérie, 2025).

II.6. Défis et contraintes de l'agrumiculture en Algérie

La culture des agrumes est confrontée à des aléas climatiques importants, notamment l'alternance entre sécheresse et pluies intenses, qui imposent une adaptation constante des pratiques culturales (Gaïdi, M. F., 25 janvier 2025).

La filière fait également face à des problématiques économiques telles que la surproduction, qui entraîne une chute des prix et pèse sur les revenus des agriculteurs. La mise en place de stratégies de commercialisation et de transformation est nécessaire pour y remédier (Maghreb Émergent, 2025).

Les maladies phytosanitaires représentent une contrainte majeure. Le "stubborn des agrumes", causé par *Spiroplasma citri*, affecte la croissance et la qualité des fruits, nécessitant des mesures de prévention rigoureuses (Wikipedia, 2023).

CHAPITRE III: LE TENSIONNOMÈTRE

III.1. Définition

Un tensiomètre est un appareil qui mesure la tension de l'eau dans le sol, reflétant l'effort que les racines doivent fournir pour absorber cette eau. Il sert à optimiser l'irrigation en indiquant le moment précis pour arroser, évitant ainsi le stress hydrique des plantes.(Cui et al., 2008)



Figure 24:un tensiomètre planté dans le sol (Lopez et al., 2024).

III.2. Utilisation

L'utilisation du tensiomètre s'inscrit dans une démarche d'optimisation de l'irrigation, visant à améliorer l'efficacité de l'eau tout en maintenant le rendement agricole. Il permet l'ajustement des pratiques d'irrigation en effectuant un suivi précis de l'humidité du sol, afin de limiter les pertes par drainage ou évaporation. Les données recueillies à l'aide de tensiètres permettent de mieux comprendre la variabilité des économies d'eau en fonction des caractéristiques du sol, des conditions climatiques et des techniques d'Irrigation employées. L'installation de tensiètres à différentes profondeurs et distances permet d'ajuster l'irrigation en fonction des caractéristiques du sol et des besoins des cultures (Serra et al., 2017).

III.3. Principe

Le tensiomètre est un instrument de mesure utilisé pour évaluer la disponibilité en eau du sol (tension hydrique du sol), un paramètre fondamental dans la gestion de l'irrigation. L'analyse de cette disponibilité permet d'optimiser les stratégies d'irrigation en déterminant les moments opportuns pour son déclenchement, sa reprise après une précipitation ou son arrêt en fin de

CHAPITRE III: LE TENSIOMÈTRE

saison. La tensiométrie se caractérise par l'évaluation du potentiel hydrique matriciel du sol, reflétant la disponibilité de l'eau pour les plantes. Les tensiomètres déterminent la force que les racines doivent exercer pour extraire l'eau. Cette mesure, exprimée en centibars (cbar), permet d'adapter les apports hydriques en fonction des besoins spécifiques des cultures et des conditions édaphiques. (Chambre d'agriculture du Tarn., 2025) - (figure 25)

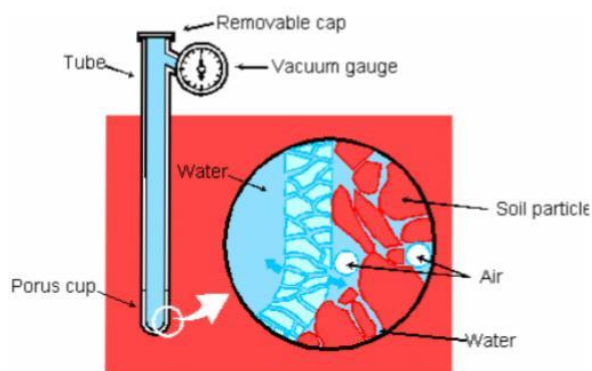


Figure 25 :Mesure de la charge de pression (ou de la succion) (Mermoud, 2004).

III.4. Composition

Un tensiomètre de sol comprend généralement sept composants principaux :

1. Bougie poreuse : En céramique, elle permet l'échange d'eau entre le sol et l'intérieur du tensiomètre tout en empêchant l'entrée d'air.
2. Tube hermétique : Rempli d'eau, il transmet la tension entre la bougie poreuse et le capteur de pression.
3. Manomètre ou capteur de pression : Mesure la force nécessaire pour extraire l'eau du sol, exprimée en centibars ou kilopascals.
4. Bouchon étanche : Scelle le système pour éviter l'entrée d'air et maintenir l'intégrité des mesures.
5. Réservoir d'eau : Assure un volume d'eau suffisant pour compenser les pertes dues à l'évaporation et aux échanges avec le sol.
6. Tube de remplissage : Facilite l'ajout d'eau et la purge d'air pour garantir un bon fonctionnement du tensiomètre. (Figure 26) .(Irrometer Company Inc, 2025).

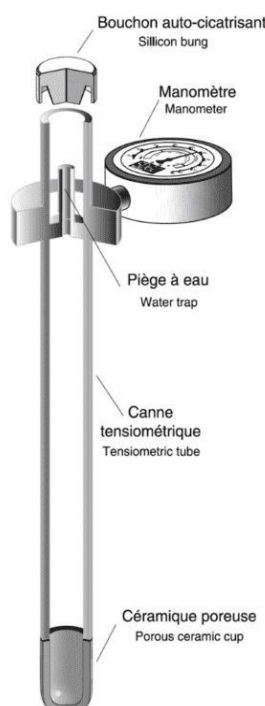


Figure 26 :la composition d'un tensiomètre (Lopez et al, 2024).

III.5. Le potentiel hydrique

Le potentiel hydrique quantifie l'énergie requise pour déplacer l'eau d'un milieu donné vers une référence pure. Essentiel en agronomie et hydrologie, il influence l'absorption de l'eau par les plantes et son mouvement dans le sol. Il aide à optimiser l'irrigation et la gestion des ressources en eau. (METER Group, 2025)

III.6. Positionnement des sondes

La fiabilité des mesures dépend surtout de l'installation et du positionnement des sondes par rapport au goutteur, plutôt que de la précision des appareils. La distance optimale varie selon la diffusion latérale de l'eau, influencée par la nature du sol : sphérique dans les sols lourds, ovale dans les sols légers. Une irrigation fréquente améliore cette diffusion.

Pour déterminer la meilleure distance sonde-goutteur, il est conseillé de tester plusieurs positions (25 à 50 cm) et de choisir celle qui reflète le mieux les variations d'humidité. Lorsque le sol est humide (< 10 cbars), surveiller les tensions et arroser dès qu'elles atteignent 20 à 30

bars, en augmentant progressivement les doses jusqu'à observer une réaction de la sonde la plus proche. (Figure 27)

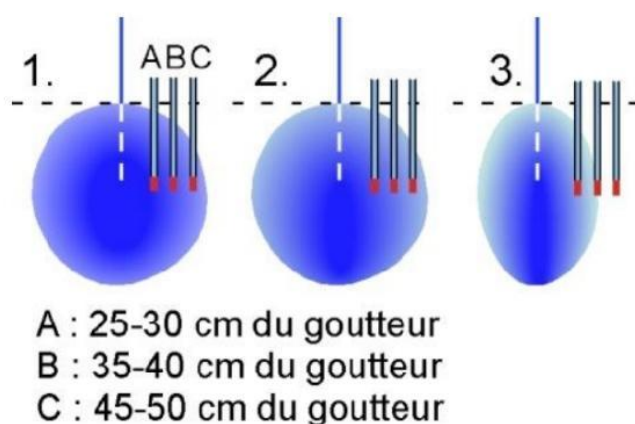


Figure 27 : Détermination de la distance optimale des sondes Par rapport au goutteur (Monney

et al, 2010)

1. Sol très conducteur, en général sol argileux. Les 3 sondes réagissent Simultanément, avec une intensité différente. La distance C peut être Retenue.
2. Sol moyennement conducteur, en général, sol de texture moyenne. La Sonde C réagit très faiblement. La distance B est retenue.
3. Sol peu conducteur, en général, sol léger, à forte teneur en sable. Seule La sonde A réagit; elle indique la distance à retenir. Privilégier des Apports fréquents et de faible quantité.

III.7. Profondeur des sondes

25-30 cm pour la sonde de surface et 50-40 cm pour la Sonde de profondeur conviennent dans la majorité des cas. (Monney et al., 2010).

Lorsque le sol se dessèche, l'eau s'échappe de la bougie poreuse vers le sol. Comme le tube est hermétique, une tension se forme à l'intérieur, mesurée par le manomètre. Plus la valeur indiquée est élevée, plus le sol est sec. À l'inverse, lorsque le sol est saturé en eau, la tension est inexistante. Ainsi, les mesures du manomètre permettent de déterminer le moment opportun pour irriguer. La plupart des tensiomètres ont une échelle allant de 0 à 100 centibars, tandis que certains modèles sont limités à une plage de 0 à 40 centibars. (Bergeron et al., 2005).

III.8. Installation

L'installation correcte d'un tensionnometre est essentielle pour mesurer avec précision la tension hydrique du sol et optimiser l'irrigation.

III.8.1. Préparation des sondes

Avant l'implantation des sondes, il est essentiel de procéder à leur amorçage :

- Dévisser le couvercle situé au sommet du tensionnometre, puis remplir le réservoir avec de l'eau.
- Éliminer les bulles d'air en tapotant doucement le réservoir ou en utilisant une pompe à vide.
- Ajouter, si nécessaire, un colorant spécifique dans l'eau afin de faciliter l'observation des variations à l'intérieur du tensionnometre.
- Revisser soigneusement le bouchon en veillant à ce que le joint soit bien positionné.

III.8.2. Installation des sondes

Un bon contact entre le tensionnometre et le sol est indispensable pour éviter toute infiltration d'air ou d'eau entre l'appareil et la terre.

- Creuser un trou à l'aide d'un tube serrurier ou d'une tarière vrille de 20 mm de diamètre extérieur (légèrement inférieur à celui du tensionnometre) en respectant scrupuleusement la profondeur requise.
- En cas de sol sec ou compact, verser un peu de boue dans le trou afin d'assurer un bon colmatage de la bougie, bien que cela puisse altérer les premières mesures.
- Insérer fermement le tensionnometre dans le trou jusqu'à sentir un contact net entre la bougie et le fond.
- Pour les sols très sableux ou humides, les tensionnometres courts peuvent être implantés directement sans préalablement creuser.

- Si le terrain est particulièrement caillouteux, réaliser un trou avec une barre à mine d'environ 20 mm de diamètre, puis le remplir de boue pour garantir une bonne adhérence de la sonde. (Agroressources, 2022)

III.9. lecture du tensiomètre et seuils d'irrigation recommandés

III.9.1. Principe de lecture des tensiomètres

La lecture du tensiomètre permet de déterminer l'humidité du sol et de savoir quand irriguer :

Plus la valeur indiquée par le tensiomètre est élevée, plus le sol est sec.

- À 0 cbar, le sol est saturé en eau (aucun besoin d'irrigation).
- À 100 cbar, le sol est très sec, l'eau est difficilement disponible pour la plante. (Monney et al, 2010).

III.9.2. Seuils d'irrigation recommandés

Les seuils d'irrigation varient selon le type de sol afin d'assurer une gestion efficace de l'eau

Sols sableux et loameux : début d'irrigation entre 15 et 25 cb.

Sols argileux : début d'irrigation entre 30 et 40 cb.

Il est conseillé d'ajouter 10 à 15 cb à la valeur mesurée après une irrigation (24 à 48 heures après) pour ajuster le déclenchement de l'irrigation.

III.9.3. Considérations spécifiques

L'ensemble du champ doit être pris en compte : une zone avec une bonne teneur en eau peut masquer des problèmes de saturation ou de sécheresse ailleurs.

- Un excès d'irrigation peut entraîner une asphyxie racinaire, réduisant ainsi la capacité des racines à absorber l'eau et les nutriments.

III.10. Utilisation des tensiomètres pour ajuster l'irrigation

Les relevés doivent être effectués quotidiennement, de préférence le matin.

- En période de forte demande en eau, une seconde lecture en après-midi peut être nécessaire.
- Si les valeurs dépassent les seuils recommandés, une irrigation doit être déclenchée.

(Bergeron et al , 2005).

III.11. Avantages et inconvénients des tensionnètres

III.11.1. Avantages

- Mesure directe de la disponibilité en eau pour les plantes : Les tensionnètres fournissent des données précises sur la tension de l'eau dans le sol, reflétant directement la disponibilité de l'eau pour les plantes. Cette information est cruciale pour ajuster l'irrigation en fonction des besoins réels des cultures. • (Weenat,2022).
- Adaptabilité à divers types de sols et de cultures : La tensionnètrie est une technique universelle qui s'adapte à tous les types de sols, de cultures et de systèmes d'irrigation. (France Pivots ,2024)
- Simplicité d'utilisation et coût abordable : Les tensionnètres sont généralement faciles à installer et à utiliser. Leur coût relativement faible en fait une option accessible pour de nombreux agriculteurs. (SDEC France,2023)
- Aide à la décision pour l'irrigation : En fournissant des données chiffrées sur l'état hydrique du sol, les tensionnètres facilitent la prise de décision en matière d'irrigation, permettant ainsi une utilisation plus efficace de l'eau. (Station Météo Agricole, 2025)

III.11.2. Inconvénients des tensiometres

- Installation fastidieuse : La mise en place des tensiomètres peut être laborieuse, nécessitant une préparation minutieuse du sol et une installation à différentes profondeurs pour obtenir des données représentatives (SDEC France, 2023)
- Volume de sol mesuré limité : Chaque tensiomètre mesure la tension de l'eau à un point précis, ce qui peut nécessiter l'installation de plusieurs appareils à différentes profondeurs et emplacements pour obtenir une vision globale de l'état hydrique d'une parcelle (Agralis Services 2024)
La sensibilité au gel (les sondes doivent impérativement Être mises à l'abri en automne et réinstallées chaque Printemps)
- L'absence de dispositif d'enregistrement automatique des Valeurs
- La plage de mesure limitée à 0-80 cbars qui ne permet pas De gérer l'irrigation déficitaire. (Monney et al., 2010)

**CHAPITRE IV: Analyse de l'irrigation
par tensiométrie dans deux vergers
d'argumes**

IV.1. Description de la région :

Le tableau suivant présente les principales informations géographiques, démographiques et climatiques de la région de Hennaya, permettant de mieux situer le contexte de l'étude.

Tableau 5: Informations sur Hennaya (DB- CITY, 2025)

| Catégorie | Valeur |
|---------------------------|--|
| Latitude | 34.95 |
| Longitude | -1.34447 |
| Coordonnées géographiques | 34° 57' 0" Nord, 1° 22' 0" Ouest |
| Superficie | 10 823 hectares (108,23 km ²) |
| Altitude | 429 m |
| Climat | Climat semi-aride sec et froid (Classification de Köppen : BSk) |
| Nombre d'habitants | 33 354 |
| Densité de population | 308,2 habitants/km ² |

IV.2. caractéristiques climatiques de hennaya

IV.2.1. Paramètres climatiques caractéristiques de la région de Hennaya

Le tableau ci-dessous synthétise les principaux paramètres climatiques de la région de Hennaya, en mettant en évidence les variations thermiques annuelles, la probabilité de ciel dégagé, la durée de la saison de croissance ainsi que les valeurs maximales du rayonnement solaire, éléments essentiels pour l'évaluation des conditions agroclimatiques de la zone d'étude

Tableau 6 : Paramètres climatiques caractéristiques de la région de Hennaya (Weather Spark, 2024)

| Paramètre | Valeur |
|----------------------------------|-----------------------------------|
| Température maximale moyenne | 15°C (janvier) - 33°C (août) |
| Température minimale moyenne | 5°C (janvier) - 20°C (août) |
| Probabilité de ciel dégagé | 58% (novembre) - 91% (juillet) |
| Durée de la saison de croissance | 11 mois (2 février - 30 décembre) |
| Rayonnement solaire maximal | 8,0 kWh (fin juin) |

IV.2.1.1. Températures à Hennaya

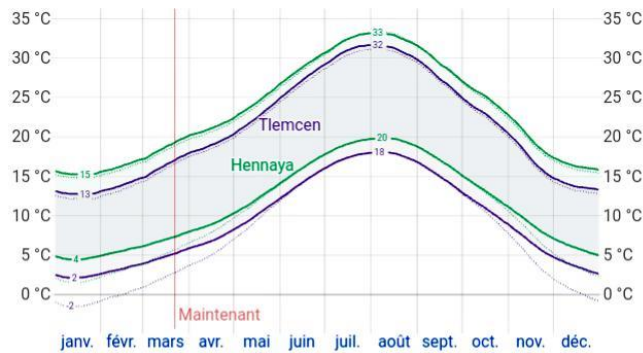


Figure 28 :Températures de Hennaya (en rouge) et Tlemcen (en bleu) en 2024 (weather spark, 2024)

IV.2.1.2. Précipitations à Hennaya

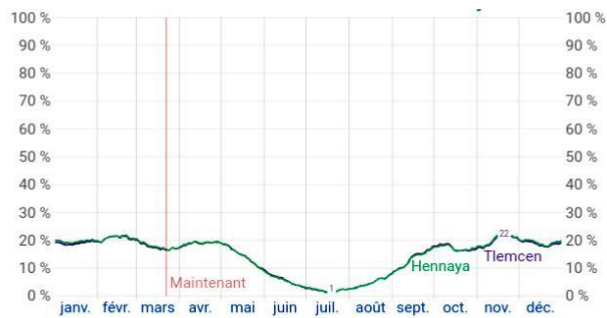


Figure 29:Probabilité de précipitation quotidienne durant 2024.(Weather spark, 2024)

V.2.1.2.1. Variabilité des précipitations annuelles

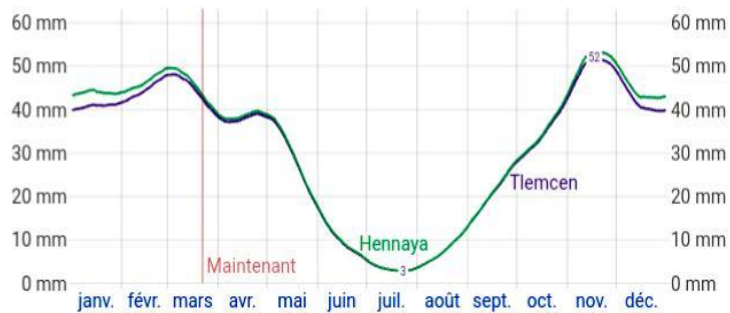


Figure 30 :Pluviométrie mensuelle moyenne durant 2024 à Tlemcen (en bleu). (Weather spark, 2024)

IV.2.1.3. Influence des températures et des précipitations sur la production d'agrumes à Hennaya

Le climat de Hennaya se caractérise par des températures contrastées et une pluviométrie faible, facteurs qui conditionnent fortement la production agrumicole. Les hivers relativement froids ralentissent la croissance végétative mais favorisent la mise au repos des arbres, essentielle à une bonne induction florale. À l'inverse, les étés sont marqués par des températures élevées dépassant fréquemment les 30 °C, ce qui accentue l'évapotranspiration et assèche rapidement les sols. Cette combinaison de chaleur intense et de faibles précipitations crée un déficit hydrique important durant la période critique de croissance et de grossissement des fruits. Le manque d'eau limite alors l'absorption des éléments nutritifs et se traduit souvent par une réduction du calibre, une chute prématurée des fruits ainsi qu'un affaiblissement général de la vigueur des arbres. Ainsi, bien que les conditions thermiques de Hennaya soient globalement favorables à la culture des agrumes, la rareté et l'irrégularité des précipitations imposent un recours indispensable à une irrigation maîtrisée pour garantir un bon rendement et une qualité optimale.

IV.3. Utilisation de la tensiométrie pour le suivi de l'humidité du sol chez deux producteurs d'agrumes

IV.3.1. Producteur 1 :

1. Description du site

Le verger d'agrumes étudié, situé à Megassem, dans la commune de Hennaya (wilaya de Tlemcen), est implanté sur un sol argileux-limoneux et s'étend sur une superficie totale de 10 hectares. Les arbres, âgés de 6 ans, sont conduits avec le porte-greffe Volka et le greffon Orogrande. Ce verger est composé de différentes variétés d'agrumes, dont principalement la clémentine et le Thompson Navel.

La clémentine occupe une superficie de 2,5 hectares, soit 25 % de la surface totale, tandis que la variété Thompson Navel s'étend sur 3,5 hectares, représentant 35 % de l'ensemble du verger.

Le reste de la superficie, soit 4 hectares (40 %), est consacré à d'autres variétés d'agrumes ou à d'autres usages agricoles, selon l'aménagement spécifique du terrain.

2. Opérations d'entretien menées par le producteur 1 :

2.1. Traitement d'hiver : Protection Contre Maladies et Parasites

En hiver, les agrumes sont vulnérables aux maladies cryptogamiques et aux parasites. Pour les protéger, deux traitements sont couramment utilisés : la bouillie bordelaise et l'huile blanche.

-La Bouillie Bordelaise : utilisée pour prévenir les maladies fongiques comme la gommose, la tavelure et le mildiou.

-Moment d'application : Après la taille, en hiver, avant le débourrement (apparition des nouvelles pousses).

-Mode d'application : Pulvérisation sur l'ensemble de l'arbre, en insistant sur les branches et le tronc.

-Effet : Crée une barrière protectrice contre les champignons et certaines bactéries.

-L'Huile Blanche : Une Protection Contre les Ravageurs

utilisée pour asphyxier les cochenilles, acariens et pucerons hivernants.

-Moment d'application : En hiver, par temps sec et hors gel.

-Mode d'application : Pulvérisation fine sur le feuillage, les branches et le tronc

-Effet : Forme une pellicule grasse qui empêche les œufs et larves de parasites de se développer.

La période de floraison et de nouaison (mid Avril) est une étape cruciale pour le rendement des agrumes. Durant cette phase, les conditions climatiques et sanitaires jouent un rôle déterminant dans la réussite de la formation des fruits.

2.2. La taille :

La taille d'entretien a été réalisée par le producteur 1 de 18 à 22 janvier 2025, en amont du traitement d'hiver. Cette intervention a permis d'éliminer le bois mort, d'aérer la structure de l'arbre et de favoriser une meilleure pénétration du traitement phytosanitaire sur l'ensemble du feuillage et des branches.

2.3. Travail du sol

Début mars, l'agriculteur a effectué un labour superficiel autour des rongs afin d'éliminer les mauvaises herbes et de favoriser une meilleure pénétration de l'eau et des fertilisants. Cette

opération améliore la disponibilité des ressources pour les cultures en réduisant la concurrence des adventices et en facilitant l'absorption des nutriments par les racines

2.4. Traitements phytosanitaires :

Après les pluies survenues durant la semaine du 8 au 15 avril, les conditions climatiques humides et fraîches ont favorisé le développement du champignon *Botrytis cinerea*, qui a infecté les arbres

Le méthylthiophanate a été appliqué à deux reprises entre la fin du mois de mars et la mi-avril pour la prévention des maladies fongiques. Par ailleurs, un traitement contre le thrips a été effectué au début du mois d'avril à l'aide du produit Spinox.

Le producteur 1 a souffert d'une forte infestation par les acariens rouges, favorisée par la chaleur, la sécheresse et la poussière provenant de la récolte du blé cultivé à proximité du verger d'agrumes. Cette poussière, en se déposant sur les feuilles, a créé un environnement favorable à ces ravageurs en réduisant l'efficacité des ennemis naturels et des traitements, tout en accentuant le stress de la plante. Le manque d'humidité a également permis aux acariens de se développer rapidement, provoquant le jaunissement, le flétrissement et la chute des feuilles. Pour remédier à la situation, il a été recommandé d'augmenter l'humidité par des pulvérisations régulières d'eau sous les feuilles, d'éliminer les parties atteintes, et de traiter avec des acaricides spécifiques : le Cyflumétofène pour toutes les phases de développement, l'Abamectine pour les adultes, l'Hexythiazox pour les larves, et le Spirodiclofène pour les œufs et les adultes. Le traitement a été appliqué tôt le matin ou en fin de journée pour une meilleure efficacité.

2.5. Fertilisation

Chaque semaine des mois de mars et d'avril, un engrais soluble de type 12-61 (phosphate monoammonique) a été apporté aux orangers.

Le 16 mars, un mélange composé de 1 kg de Borozinc et de 600 g de Nutricat a été incorporé dans 400 litres d'eau, puis appliqué au verger d'orangers

Utilisation du B zincal

d'argumes

Le B Zincal : un engrais foliaire formulé pour corriger les carences en bore (B) et zinc (Zn) .

(Figure 31) Avec une dose de 1kg/100 l d'eau , appliqué le 19 Avril 2025



Figure 31: quelques produits utilisés par le producteur (1) pour stimuler et traiter les arbres (photos personnelles, 2025)

2.6. Irrigation

Un système d'irrigation goutte à goutte, avec un débit de 80 L/h, est installé pour optimiser l'apport en eau des arbres . L'irrigation est réalisée une fois par semaine, avec une durée de 1 à 1h30 selon les besoins de l'arbre (80 à 120 L/semaine)

3. Utilisation des tensiomètres

3.1. Installation



Figure 32 :tensiomètres installés dans le sol (photo personnelle, 2025)

Deux tensiomètres ont été installés afin de mesurer l'humidité du sol à différentes profondeurs et distances par rapport au tronc de l'arbre (figure 32). Le premier a été placé à une profondeur de 25 cm et installé à une distance de 40 cm du tronc (figure 33) permettant ainsi d'évaluer l'humidité dans la zone proche des racines superficielles. Le second tensiomètre a été positionné plus en profondeur, à 45 cm, et placé à 20 cm du premier, afin de comparer les variations

d'humidité entre ces deux niveaux et d'obtenir une analyse plus précise de l'infiltration de l'eau et de son accessibilité pour l'arbre. Les résultats obtenus sont portés sur le tableau du suivi 1.



Figure 33 :représentation des dimensions d'installation des tensiomètres (réalisation personnelle, 2025)

3.2. Suivre de la tensiométrie

Le tableau suivant présente le suivi des mesures tensiométriques effectuées chez le premier producteur d'agrumes durant la période d'étude :

Tableau 7 :Tableau de suivi (1)

| Jour | Tensiomètre 1 (cb) | Tensiomètre 2 (cb) | Irrigation |
|------------|--------------------|--------------------|------------|
| 22/03/2025 | 20 | 20 | Oui |
| 24/03/2025 | 24 | 24 | / |
| 30/03/2025 | 24 | 30 | / |
| 04/04/2025 | 30 | 34 | / |
| 08/04/2025 | 34 | 40 | / |
| 12/04/2025 | 37 | 43 | / |
| 14/04/2025 | 28 | 31 | / |
| 20/04/2025 | 34 | 34 | / |
| 24/04/2025 | 35 | 40 | / |
| 28/04/2025 | 38 | 40 | / |
| 29/04/2025 | 15 | 25 | Oui |
| 30/04/2025 | 08 | 10 | Oui |
| 04/05/2025 | 22 | 28 | / |

| | | | |
|------------|----|----|---|
| 07/05/2025 | 42 | 42 | / |
|------------|----|----|---|

3.3. Analyse du tableau

L'étude a été menée entre le 22 Mars et le 7 Mai 2025, une période critique dans le cycle de développement des agrumes, marquée par des besoins hydriques accrus afin de soutenir la floraison et la formation des jeunes fruits.

Une première irrigation a été réalisée le 22 mars 2025, à un moment où les deux tensiomètres affichaient des valeurs modérées (20 cb), traduisant un sol encore bien pourvu en eau.

À la suite de cette intervention, aucune irrigation n'a été effectuée pendant plus d'un mois, période durant laquelle les tensions ont progressivement augmenté, atteignant des niveaux élevés, traduisant une teneur en eau du sol faible et une humidité insuffisante pour répondre aux besoins physiologiques des agrumes.

Cette évolution reflète une situation de stress hydrique pour les arbres.

- Le 12 avril, les valeurs mesurées ont dépassé les 37 cb, confirmant un stress hydrique avancé. Cette période aurait nécessité un apport hydrique urgent.
- L'irrigation n'a été reprise que le 29 et 30 avril, soit plus de deux semaines après les premiers signes de déficit sévère.
- Ces deux irrigations successives ont entraîné une chute brutale des tensions à des niveaux très bas (8 à 10 cb le 30/04), indiquant une saturation du sol en eau.
- À ce stade, une seule irrigation aurait été suffisante pour réhydrater le sol. L'apport du deuxième jour s'est avéré excessif et inutile, représentant un gaspillage d'eau dans un contexte où la ressource est précieuse.
- .Malgré la double irrigation des 29 et 30 avril, les valeurs mesurées le 7 mai atteignent à nouveau 42 cb sur les deux sondes, ce qui confirme un retour rapide à une situation de déficit hydrique sévère.
- Ce retour brutal à des valeurs critiques en moins d'une semaine montre que le besoin hydrique des arbres n'a pas été couvert durablement, et que la stratégie de rattrapage ponctuel n'a pas suffi à stabiliser l'humidité du sol.

-
- L'analyse globale met en évidence une absence de suivi rapproché des tensions du sol, ainsi qu'un manque d'ajustement des volumes et fréquences d'irrigation en fonction de l'état réel du sol.
 - Cette irrégularité, alternant entre périodes de sécheresse prolongée et apports excessifs, a exposé les agrumes à un stress hydrique instable, néfaste pour leur équilibre physiologique.
 - Elle a aussi favorisé l'apparition d'autres problèmes observés dans le verger, notamment la chute des feuilles et des fleurs, le ralentissement de croissance, et la présence accrue de ravageurs.

3.4. Observations :

- La différence entre les deux tensiomètres (25 cm et 45 cm) s'explique par la variation de l'humidité selon la profondeur du sol.
- La couche superficielle (25 cm) est plus exposée à l'évaporation à cause du vent et des températures élevées, ce qui entraîne une perte rapide d'humidité.
- En revanche, la couche profonde (45 cm) est moins affectée par ces facteurs et conserve l'humidité plus longtemps, avec des variations plus lentes.
- Ces différences expliquent les écarts de lecture entre les deux tensiomètres, surtout en cas de sécheresse ou d'irrigation irrégulière.
- Malgré des précipitations parfois abondantes, les tensiomètres ont continué à indiquer un état de sécheresse.
- Les pluies étaient de forte intensité mais de courte durée, favorisant le ruissellement en surface plutôt que l'infiltration en profondeur.
- Il est possible que les travaux de sol aient été limités aux couches superficielles, ce qui a réduit la porosité des couches profondes et freiné l'infiltration de l'eau.
- L'évaporation rapide due au vent et à la chaleur a également limité la quantité d'eau réellement absorbée par le sol. En conséquence, l'eau n'a pas atteint la profondeur du tensiomètre de 45 cm, maintenant des valeurs indiquant un stress hydrique.

4. Limitations techniques et agronomiques chez le producteur 1 durant l'étude

4.1. Irrégularité de l'irrigation

- L'agriculteur n'a pas pu assurer une irrigation régulière de ses agrumes durant plusieurs périodes prolongées.

r

- Ces interruptions sont dues à des défaillances matérielles affectant le système d'irrigation installé.
- La pompe, pièce essentielle de l'installation, est tombée en panne à plusieurs reprises au cours de la campagne.
- Ces pannes ont entraîné une interruption totale de l'alimentation en eau dans l'ensemble du verger.
- Les périodes sans irrigation ont coïncidé avec un stade sensible de développement des agrumes, (la floraison).

- Une fois le système réparé, l'agriculteur a repris l'irrigation avec des volumes d'eau importants.
- L'objectif était de compenser les périodes précédentes de déficit hydrique.
- Les irrigations réalisées après la réparation ont été plus fréquentes et plus abondantes que celles pratiquées habituellement.
- Des apports d'eau supérieurs aux quantités habituellement observées ont été enregistrés à plusieurs reprises.

4.2. Observations sur les ravageurs

Les ravageurs identifiés sont :

- Les pucerons, présents sur les jeunes feuilles et les extrémités des rameaux (figure 34)
- Les thrips, visibles sur les jeunes fruits
- Les acariens, principalement localisés sur la face inférieure des feuilles.

Plusieurs symptômes visuels ont été relevés :

- Déformation des feuilles au niveau des jeunes pousses,
- Présence de taches argentées et brunâtres sur les jeunes fruits,
- Ralentissement de la croissance des jeunes rameaux,
- Aspect terne ou décoloré des feuilles infestées par les acariens.

Les infestations sont réparties de manière inégale dans le verger, touchant certains arbres de façon plus marquée que d'autres.



Figure 34 :infestation d'un oranger par les pucerons

4.3. Évolution du feuillage – Jaunissement

- Un jaunissement des feuilles a été observé sur plusieurs sujets du verger.
- Les feuilles concernées étaient situées sur les parties moyennes et inférieures des arbres.
- La couleur des feuilles atteintes passait du vert pâle au jaune plus ou moins uniforme.
- Ce jaunissement a été observé sur différents secteurs du verger, avec des degrés d'intensité variables.
- Dans certains cas, le jaunissement touchait plusieurs rameaux d'un même arbre.
- Les feuilles jaunes restaient parfois accrochées aux branches, parfois tombaient rapidement.
- Ce phénomène a été relevé à plusieurs reprises au cours de la période de suivi.

4.4. Chute physiologique des fleurs

Une chute importante de fleurs a été constatée sur une partie notable des agrumes observés.(Figure 35) Cette chute s'est étendue progressivement à plusieurs zones du verger.

Les fleurs tombées étaient parfois bien développées, parfois encore en phase de croissance. Dans certains cas, les arbres présentaient des branches partiellement dépourvues de fleurs.

Le phénomène a été observé sur des arbres isolés, mais également sur des regroupements d'arbres dans certaines zones.

L'intensité de la chute variait d'un arbre à l'autre.

Les fleurs tombées ne présentaient pas de nécroses ni de taches caractéristiques de maladies visibles.



Figure 35 : chute physiologique des fleurs (photo personnelle, 2025)

Cette chute a été suivie, chez certains sujets, d'un ralentissement net du développement des nouvelles pousses.

4.5. Symptômes compatibles avec une maladie fongique (*Fusarium* suspecte)

- Les symptômes observés sont le flétrissement et le jaunissement des fleurs et des jeunes fruits, suivis de leur noircissement, dessèchement puis chute, dus à l'infection par le champignon *Fusarium* qui attaque les tissus vasculaires et bloque la circulation de la sève. (figure 36)



Figure 36 : fusarium sur les fleurs d'un orange (photo personnelle, 2025)

5. Interprétations des contraintes rencontrées

Dans le cadre de la présente étude, il est apparu que plusieurs contraintes rencontrées par les producteurs d'agrumes trouvent principalement leur origine dans une irrigation inadéquate. En effet, les irrégularités dans l'apport en eau, qu'elles soient dues à des pannes techniques, à une gestion inappropriée ou à des pratiques de rattrapage mal maîtrisées, engendrent des déséquilibres hydriques importants. Ces derniers se traduisent par des perturbations physiologiques et nutritionnelles affectant directement la croissance, la productivité et la qualité des vergers. Les points ci-après exposent les principales manifestations de ces contraintes et leurs impacts sur les agrumes.

5.1. Stress hydrique prolongé dû aux pannes d'irrigation

Chez le premier producteur, l'indisponibilité prolongée de la pompe a conduit à une interruption répétée de l'irrigation, en particulier durant des périodes sensibles du cycle des agrumes. Cette situation a induit un stress hydrique chronique, affectant directement la turgescence cellulaire et perturbant les fonctions physiologiques essentielles telles que la photosynthèse, la respiration et la croissance. Le manque d'eau a entraîné la fermeture des

stomates, limitant les échanges gazeux, ce qui s'est traduit par une réduction significative de l'activité photosynthétique et de la synthèse des composés organiques nécessaires au développement des organes végétatifs.

5.2. Chute des fleurs

Face au déficit hydrique, les agrumes ont présenté une chute massive des fleurs, observée dans plusieurs zones du verger. Cet effet de la sécheresse s'est traduit par une réduction importante du potentiel de fructification. La perte florale a ainsi compromis directement la formation des fruits et, par conséquent, diminué le rendement attendu de la récolte.

5.3. Déséquilibre hydrique et perturbation de l'absorption nutritionnelle

Lorsque l'irrigation a repris, le producteur a appliqué de fortes quantités d'eau dans le but de compenser le déficit accumulé. Ce rattrapage brutal a provoqué une saturation temporaire du sol, entraînant une lixiviation des éléments nutritifs, en particulier de l'azote. L'absorption racinaire a été perturbée par ces fluctuations extrêmes de l'humidité, ce qui a réduit la disponibilité des nutriments pour la plante. Le jaunissement progressif des feuilles, observé chez plusieurs arbres, témoigne d'une carence azotée fonctionnelle, directement liée à ce déséquilibre.

Le travail du sol améliore son aération, ce qui expose les microorganismes anaérobies, habituellement situés en profondeur, à l'oxygène. Cette exposition perturbe leur fonctionnement, entraînant un déséquilibre de la microflore. En parallèle, les microorganismes aérobies deviennent dominants, ce qui accélère la décomposition de la matière organique et entraîne une libération rapide de l'azote sous forme minérale.

Cependant, en l'absence d'une bonne structure du sol ou d'une gestion fertilitaire adaptée, cet azote minéral est rapidement perdu par lessivage ou volatilisation. Cette perte peut entraîner une carence azotée chez les agrumes, provoquant un stress nutritionnel. Ce stress se manifeste notamment par le jaunissement des feuilles, symptôme typique de chlorose liée à un déficit en azote, compromettant ainsi la santé et la productivité des arbres.

6. Conséquences agronomiques et physiologiques

L'ensemble de ces déséquilibres – stress hydrique, chute de feuillage, carence nutritionnelle a entraîné un affaiblissement global de l'état physiologique des agrumes. Les arbres ont montré une vitalité réduite, un développement végétatif limité et une prédisposition accrue aux agressions extérieures. À moyen terme, ces dysfonctionnements risquent d'impacter négativement la floraison, la nouaison et la qualité des fruits. L'analyse de ces éléments souligne l'importance d'une gestion régulière, préventive et équilibrée de l'irrigation, particulièrement dans les systèmes dépendants du goutte-à-goutte.

L'état physiologique affaibli des agrumes, consécutif au stress hydrique et aux carences nutritionnelles, a été suivi de l'apparition de ravageurs dans plusieurs zones du verger. Des présences de pucerons, de thrips et d'acariens ont été relevées sur différents arbres. Ces organismes ont été observés principalement au niveau des jeunes pousses et des parties végétatives en croissance. Leur distribution était hétérogène selon les emplacements. Dans le même temps, certains arbres présentaient des signes visibles de dessèchement partiel de rameaux et de branches. Une coloration anormale a été notée au niveau du collet de quelques sujets. Ces observations ont été faites de manière répétée au cours des visites régulières, dans un contexte général de faiblesse physiologique des arbres.

7. Rôle essentiel du tensiomètre dans la détection du stress hydrique

Dans ce cas, l'utilisation du tensiomètre s'est révélée déterminante, car elle a mis en évidence un état de sécheresse du sol malgré la survenue de précipitations. Cet instrument, en mesurant directement la tension de l'eau dans le sol, a permis de détecter un déficit hydrique que l'observation visuelle ou la simple prise en compte des données pluviométriques n'auraient pas pu révéler. En effet, sans cet outil, il aurait été facile de conclure, à tort, que le sol était suffisamment humide, voire saturé, uniquement en se basant sur la quantité de pluie reçue. Ce constat met en lumière l'importance d'un suivi précis et instrumenté de l'humidité du sol, indispensable pour ajuster les apports en irrigation et prévenir les risques de stress hydrique affectant le développement et la productivité des cultures.

8. Impact du stress hydrique et des interventions retardées sur le verger d'agrumes

Au moment de notre arrivée dans le verger d'agrumes, l'état des arbres était déjà fortement dégradé. De plus, les interventions culturales et hydriques avaient été retardées ou mal appliquées, ce qui a entraîné un stress hydrique marqué et abouti à une récolte nulle.

IV.3.2. Producteur 2

1. Description du site

Situé à Hennaya, Le verger étudié s'étend sur une superficie totale de 16 hectares, établi sur un sol argileux lumineux .. Les arbres, âgés de 3 ans, sont greffés sur porte-greffe Volka, apprécié pour sa tolérance aux sols lourds et sa résistance aux conditions climatiques exigeantes. Le greffon est constitué de variétés d'oranges, destinées principalement à la production de fruits de table de haute qualité.

2. Opérations d'entretien menées par le producteur 2

2.1. Travail de sol

Au cours du mois de décembre 2025, le producteur 2 a réalisé une opération d'amendement organique en apportant du fumier dans sa parcelle d'agrumes. Le fumier a été appliqué autour de chaque arbre, précisément dans la zone de projection du feuillage, puis légèrement enfoui dans les premiers centimètres du sol afin de favoriser son intégration progressive. L'opération s'est déroulée manuellement, sans recours à un travail mécanisé généralisé du sol. Aucun autre amendement ou fertilisant n'a été associé à cette intervention à cette période.

Concernant l'état du sol, le producteur n'a pas effectué de travail du sol en profondeur durant la période d'étude. Seule une coupe partielle des adventices a été réalisée, consistant en une réduction mécanique de la hauteur de la végétation spontanée, sans élimination complète. Les adventices ont ainsi continué à se développer dans plusieurs zones de la parcelle, en l'absence de désherbage chimique ou d'entretien régulier.

2.2.Fertilisation et traitements phytosanitaires

2.2.1. Fertilisation

Le programme de fertilisation appliqué par le producteur 2 était établi comme suit:

Fin février :

Alga 400 – 500 g / 400 L d'eau

→ Biostimulant à base d'algues marines, appliqué après les vents pour relancer la végétation et favoriser une meilleure fructification.

Début mars :

Folicat Calcium – 1200 ml / 400 L d'eau

→ Apport de calcium et magnésium, essentiel pour renforcer les tissus végétaux et améliorer la qualité des fruits.

Mi-mars :

Mélange de :

Borozinc – 1 kg / 400 L d'eau

→ Fournit bore et zinc, oligo-éléments indispensables à la floraison, à la fécondation et à la croissance des jeunes fruits.

Nutricat – 400 g / 400 L d'eau

→ Correcteur de carences et fortifiant général, améliorant la nutrition minérale de l'arbre.

Depuis mars (hebdomadaire) :

Engrais soluble 12-41

→ Riche en phosphore, appliqué régulièrement pour soutenir la floraison et la nouaison.

Mars (complément) :

Fengib – 320 ml / 400 L d'eau

→ Renforce la résistance des plantes face aux stress biotiques et abiotiques.

GA3 (acide gibbérellique) – 4 g / 400 L d'eau

→ Stimule la croissance des fruits, améliore la nouaison et assure un développement uniforme.

2.2.2. Traitements phytosanitaires

- Fin mars et 14 jours plus tard :

Méthyl tryptophanate – 1 kg / 100 L d'eau

→ Fongicide systémique appliqué en préventif et curatif pour contrôler les maladies fongiques comme l'alternariose et l'antracnose.

-17 avril 2025 :

Méthylthiophanate (thiophanate-méthyl) – 1 kg / 100 L d'eau

→ Traitement curatif contre Botrytis, champignon provoquant des pourritures en conditions humides. Ce produit protège les feuilles, les fruits et les racines.

-Printemps (en période de forte pression) :

Spinox – en pulvérisation foliaire

→ Insecticide ciblé contre les thrips, ravageurs responsables de déformations sur jeunes fruits et de pertes de qualité commerciale.

- L'agriculteur a appliqué deux traitements successifs à base de biostimulants foliaires sur les agrumes dans le cadre de son programme de gestion culturale. Le 18 mai 2025, il a utilisé Leili 2000, un biostimulant et antistress foliaire reconnu pour améliorer la tolérance des plantes aux conditions climatiques défavorables, stimuler la croissance végétative et renforcer la vitalité générale des agrumes.

- Par la suite, le 22 mai 2025, un second traitement a été effectué avec Algreen, également un biostimulant et antistress foliaire. Ce produit complète l'action du précédent en soutenant l'activité physiologique des plantes, en stimulant la photosynthèse et en favorisant un meilleur métabolisme des nutriments. Ces applications visent à optimiser la santé et la productivité des agrumes tout en renforçant leur résilience face aux stress abiotiques.

3.Irrigation et tensiométrie

Depuis le mois de février, l'agriculteur a mis en place un programme d'irrigation rigoureux et régulier pour l'ensemble de sa parcelle d'orangers, afin de répondre aux besoins hydriques

croissants des arbres en période végétative. Ce programme repose sur un système d'irrigation localisée de type goutte-à-goutte, reconnu pour son efficacité et sa capacité à limiter les pertes en eau par évaporation ou ruissellement.

Chaque oranger est alimenté par deux lignes d'irrigation positionnées de part et d'autre du tronc, de manière à couvrir une large zone du système racinaire. Chaque ligne est équipée de trois goutteurs espacés uniformément, soit un total de six goutteurs par arbre. Ces goutteurs sont calibrés pour délivrer un débit constant de 4 litres par heure. L'agriculteur maintient chaque séance d'irrigation pendant une durée de 1 heure et 30 minutes, ce qui permet à chaque oranger de recevoir un volume total de 34 litres d'eau à chaque arrosage ($4 \text{ goutteurs} \times 4 \text{ L/h} \times 1,5 \text{ h}$).

Ce régime d'irrigation est appliqué deux fois par semaine, assurant un apport hebdomadaire de 72 litres par arbre. Cette fréquence a été déterminée en fonction des caractéristiques pédoclimatiques locales, du stade de développement des arbres, et de la capacité de rétention en eau du sol. L'objectif est de maintenir une humidité optimale dans la zone racinaire active, sans provoquer de saturation, afin de favoriser une croissance saine, une floraison équilibrée et une bonne qualité des fruits.

Pour évaluer l'efficacité de l'irrigation, nous avons planté un tensiomètre à 30 cm du tronc et à une profondeur de 35 cm, ce qui correspond à une distance intermédiaire par rapport au système racinaire de l'oranger. (Figure 37)



Figure 37: Représentation d'un oranger avec tensiomètre installé dans le sol et dimensions d'enfouissement (réalisation personnelle, 2025)

Dans le cadre du suivi de l'état hydrique du sol, nous avons réalisé une série de mesures de tensiométrie entre le 8 mai et le 17 juin 2025 (tableau 7).

Tableau 8 : Tableau de suivi (2)

| Jour | Tension (cb) | Irrigation |
|------------|--------------|------------|
| 08/05/2025 | 22 | Oui |
| 10/05/2025 | 25 | / |
| 12/05/2025 | 25 | / |
| 19/05/2025 | 20 | Oui |
| 20/05/2025 | 30 | / |
| 23/05/2025 | 23 | Oui |
| 25/05/2025 | 20 | / |
| 28/05/2025 | 12 | Oui |
| 17/06/2025 | 40 | / |

- L'irrigation est globalement bien gérée : après chaque arrosage, la tensiométrie montre une nette amélioration de l'humidité du sol. Cela confirme que l'eau est bien absorbée et atteint la zone racinaire.
- On remarque toutefois que certains arrosages ont été un peu tardifs, alors que le sol montrait déjà des signes de dessèchement. Il serait utile d'anticiper un peu plus ces moments.
- Dans certains cas, le sol est resté trop sec trop longtemps, ce qui peut provoquer un stress pour les plantes. Cela souligne l'importance de suivre régulièrement les mesures et d'agir dès que la tension dépasse un certain seuil.

3. Limitations techniques et agronomiques chez le producteur 2 durant l'étude

4.1. Dysfonctionnement du système d'irrigation

Le tensiomètre s'est révélé particulièrement utile pour détecter un dysfonctionnement au niveau du système d'irrigation. En effet, malgré une irrigation programmée et régulière, l'appareil a indiqué des valeurs correspondant à un sol sec, incohérentes avec les apports prévus. Cette alerte a conduit à une vérification du réseau de goutte-à-goutte, où une accumulation de sels obstruant les orifices des tuyaux a été observée, limitant fortement le débit d'eau.

Face à cette situation, le producteur a été contraint d'ajouter une heure supplémentaire d'irrigation afin de compenser le déficit hydrique.

4.2. Observation des symptômes physiologiques

Chez le deuxième agriculteur, nous avons constaté une chute physiologique importante des fleurs et des fruits en développement sur les agrumes. Le phénomène s'est manifesté de façon similaire à celui observé chez le premier producteur, avec une perte progressive touchant plusieurs arbres du verger. Environ 95 % des fleurs sont tombées, ce qui a fortement réduit le potentiel de nouaison.

De plus, une partie des fruits déjà formés a également été affectée par une chute prématurée au cours de leur développement (figure 38). Ce phénomène, accentué par des conditions climatiques défavorables et un stress hydrique probable, a engendré une diminution supplémentaire du nombre de fruits arrivant à maturité, impactant directement le rendement final attendu.



Figure 38 : chute physiologique des fruits (photo personnelle.,2025)

4.3. Absence de brise-vent et vulnérabilité climatique

Nous avons également relevé l'absence de toute protection périphérique sous forme de brise-vent autour de la parcelle. Le verger est entièrement ouvert et exposé sur l'ensemble de ses côtés, sans haies, filets ou plantations protectrices. Cette situation accroît sa vulnérabilité aux

aléas climatiques, notamment lors d'épisodes de vents forts ou de conditions météorologiques défavorables.

4.4. Problématique de la salinité de l'eau

Lors du suivi technique, la mesure de la salinité de l'eau d'irrigation a révélé une concentration en sels dissous de 6 g/l, une valeur relativement élevée pour une culture sensible comme les agrumes. L'échantillon a été prélevé directement au niveau du point de pompage, et l'eau est appliquée telle quelle, sans traitement ni dilution.

Afin de limiter les effets négatifs de cette salinité, le producteur a adopté une double stratégie:

- Amélioration des propriétés du sol par l'apport de gypse agricole ;
- Soutien physiologique des arbres grâce à l'utilisation d'acides aminés, permettant de réduire le stress salin et de maintenir la vigueur des arbres.

4.5. État sanitaire des vergers

L'observation du système d'irrigation a confirmé la présence de dépôts de calcaire et de sels dans les conduites, particulièrement au niveau des goutteurs situés en bout de ligne.

De plus, la présence de l'antracnose a été détectée sur plusieurs arbres. Les symptômes observés sont caractéristiques :

- taches sombres et irrégulières sur les feuilles, bordées d'un halo jaunâtre ;
- déformation et dessèchement des jeunes pousses ;
- chute prématurée des fleurs sur certains arbres.

5. Reprise de vigueur des agrumes

malgré ce problème de chute, l'état des arbres s'est nettement amélioré grâce à nos recommandations, notamment l'optimisation de l'irrigation via la tensiométrie et la mise en place d'une surveillance précoce permettant de détecter rapidement les premiers signes d'attaques de ravageurs et de champignons. Les nouvelles pousses se sont bien développées, le feuillage est redevenu plus vert et plus dense, et la vigueur générale des agrumes s'est renforcée. (figure 39)



Figure 39: Reprise de vigueur des agrumes (photo personnelle., 2025)

6. Résultat sur le rendement agrumicole dans la région de Hennaya

Dans la région de Hennaya, les rendements agrumicoles enregistrés cette année sont significativement inférieurs à ceux des années précédentes. La théorie la plus probable pour expliquer cette baisse est liée aux effets du changement climatique, qui se traduisent par :

- Une irrégularité accrue des précipitations,
- Une diminution globale des ressources en eau,
- Une augmentation des températures moyennes favorisant l'évapotranspiration,
- Une fréquence plus élevée des épisodes de sécheresse.

Ces facteurs combinés fragilisent la production agrumicole et expliquent la réduction notable du rendement moyen observée dans la région.

7. Comparaison du système de production (basée sur l'irrigation et la tensiométrie)

Les deux producteurs étudiés disposent d'un système d'irrigation localisée par goutte-à-goutte, complété par l'utilisation de tensiomètres destinés à optimiser la gestion de l'eau.

Cependant, les pratiques observées révèlent des différences notables dans la conduite de l'irrigation et dans l'intégration réelle de la tensiométrie au processus de décision.

Chez le premier producteur, la tensiométrie a bien été mise en place, mais son utilisation est restée limitée à la simple observation des valeurs, sans réelle interprétation agronomique. Les irrigations ont souvent été déclenchées tardivement ou de manière irrégulière, sans correspondre aux besoins réels du sol et de la plante. Ce manque de précision a conduit à des périodes alternées de stress hydrique et de sur-irrigation, perturbant l'équilibre physiologique des arbres. Ces conditions défavorables se sont traduites par un affaiblissement de la vigueur végétative, une floraison incomplète et, en conséquence, un rendement particulièrement faible.

Chez le second producteur, la conduite de l'irrigation reposait également sur la tensiométrie, mais avec une application légèrement plus rigoureuse. Malgré certains problèmes techniques — tels que l'obstruction partielle des goutteurs et la salinité élevée de l'eau — la fréquence des apports a été mieux adaptée, permettant une disponibilité hydrique plus régulière. Le suivi tensiométrique, bien qu'imparfait, a contribué à une meilleure réactivité face aux variations d'humidité du sol. Cette approche a permis d'obtenir un rendement légèrement supérieur à celui du premier producteur, sans toutefois atteindre les niveaux attendus pour la région.

Globalement, les deux systèmes de production restent marqués par un faible rendement, dont les causes dépassent la seule gestion de l'irrigation. Ce résultat s'explique en grande partie par les effets du changement climatique, notamment la réduction des précipitations, l'irrégularité des saisons et l'augmentation des températures, qui accentuent les déficits hydriques et réduisent l'efficacité des apports en eau. À cela s'ajoute la non-maîtrise de plusieurs opérations d'entretien essentielles : nettoyage et vérification du réseau d'irrigation, entretien des tensiomètres, gestion de la fertilisation, taille, et contrôle sanitaire. Ces insuffisances techniques ont limité la capacité des arbres à valoriser les ressources disponibles, compromettant à la fois la qualité et la quantité de la production.

Ainsi, malgré la présence d'un système moderne d'irrigation et d'un outil de pilotage performant comme la tensiométrie, l'efficacité globale du dispositif reste faible. L'amélioration des rendements passe donc par une meilleure interprétation des données tensiométriques, une

formation pratique des producteurs, et une mise à niveau des pratiques d'entretien afin de renforcer la résilience du verger face aux contraintes climatiques actuelles.

CHAPITRE V : UTILISATION DU TENSIONNÈTRE ET OPTIMISATION DES PRATIQUES D'IRRIGATION

V.1. Introduction

Au cours de notre étude, nous avons constaté plusieurs erreurs de manipulation lors de l'utilisation des tensiomètres.

Ces erreurs ont eu des conséquences importantes, notamment :

- la casse de deux tensiomètres, entraînant une perte matérielle,
- le faussage de certaines valeurs mesurées, particulièrement au début de l'expérimentation.

Ces incidents soulignent l'importance de respecter des consignes précises pour garantir la fiabilité des données et préserver l'intégrité du matériel.

V.2. Instructions pour éviter les erreurs lors de l'utilisation des tensiomètres

- Préparation du trou d'installation :

-Le premier point critique concerne la préparation du trou destiné à accueillir le tensiomètre.

-Le trou doit être le plus vertical possible.

Un trou incliné augmente le risque que la bougie en céramique se coince dans le sol.

-Lors du retrait, cette mauvaise inclinaison peut provoquer une casse de la bougie, rendant le tensiomètre inutilisable.

- Humidification du sol avant retrait

-Humidifier le sol avant de retirer le tensiomètre est une étape essentielle.

-L'humidité assouplit la terre autour de la bougie en céramique, ce qui facilite l'extraction.

-Cela diminue considérablement le risque de casse, surtout dans les sols secs ou compacts.

- Technique de retrait du tensiomètre

Lors du retrait, il est important d'éviter une traction brusque.

La bonne méthode consiste à tirer le tensiomètre vers le haut en effectuant un léger mouvement circulaire.

Ce geste progressif permet de dégager doucement la bougie et de limiter les contraintes mécaniques sur celle-ci.

- Remplissage du tensiomètre

- Le remplissage est une étape qui influe directement sur la précision des mesures.
- Le tensiomètre doit être rempli avec de l'eau dégazée.
- La présence de bulles d'air à l'intérieur du tube fausse la lecture de la tension de l'eau dans le sol.
- Un remplissage minutieux est donc indispensable pour assurer des mesures fiables et régulières.

- Positionnement par rapport aux racines

- Le tensiomètre ne doit pas être installé trop près des racines.
- La présence de racines peut gêner l'insertion de la bougie et provoquer des obstacles physiques, Cela peut également entraîner des mesures non représentatives de l'humidité générale du sol, car la zone racinaire immédiate est souvent plus sèche.

- Scellement de la bougie en céramique

- La bougie en céramique doit être parfaitement scellée dans le sol.
 - Un bon contact terre-céramique est indispensable pour assurer l'exactitude de la mesure.
- Si la bougie n'est pas correctement scellée, des poches d'air peuvent se former et perturber les relevés.

V.3. Apport du tensiomètre dans l'amélioration des pratiques d'irrigation en contexte aride et traditionnel

Dans le cadre de notre étude, nous avons observé que le tensiomètre peut constituer un outil clé pour améliorer la gestion de l'irrigation, en particulier dans les régions à climat aride, où l'eau est une ressource rare et précieuse.

-Optimisation de la gestion de l'eau : le tensiomètre permet d'ajuster les irrigations en fonction des besoins réels du sol et des plantes. Contrairement aux méthodes traditionnelles basées sur

l'observation visuelle ou sur des estimations approximatives, cet outil fournit des données fiables et objectives.

-Adaptation face aux pratiques agricoles traditionnelles : dans les systèmes agricoles traditionnels, les irrigations sont souvent déclenchées sans référence précise, ce qui conduit parfois à des excès d'eau, ou, au contraire, des stress hydriques pour les cultures.

- L'usage du tensiomètre permet une transition vers une irrigation raisonnée, en optimisant chaque apport d'eau et en réduisant les gaspillages.

- Protection du sol et amélioration de sa structure : Une irrigation mal gérée peut entraîner le compactage du sol et la dégradation de sa structure. En fournissant des informations précises, le tensiomètre aide à éviter les arrosages excessifs, préservant ainsi la qualité physique du sol.

- Vers une irrigation durable : L'intégration du tensiomètre dans les pratiques agricoles constitue une étape vers la durabilité des systèmes d'irrigation. Cet outil favorise une meilleure gestion des ressources hydriques dans un contexte marqué par la rareté de l'eau, et les contraintes climatiques croissantes.

Conclusion

Conclusion

L'analyse comparative réalisée dans cette étude souligne avec clarté que la réussite et la durabilité des vergers d'agrumes reposent sur une approche intégrée, combinant observation du terrain, recours à des outils de suivi et gestion culturale adaptée aux conditions locales. Dans un contexte marqué par la variabilité climatique, la rareté croissante de l'eau et la sensibilité particulière des agrumes aux stress hydriques et nutritionnels, il devient impératif de dépasser les pratiques basées uniquement sur l'intuition ou l'expérience. L'agriculture moderne exige en effet un pilotage précis, raisonné et appuyé par des données fiables.

L'utilisation du tensiomètre, au cours de cette étude, a démontré toute sa pertinence. Simple mais efficace, cet outil a permis de mettre en évidence des situations d'insuffisance hydrique malgré un programme d'irrigation régulier, révélant ainsi l'importance de diagnostiquer et de corriger en temps réel les dysfonctionnements du système. Il illustre la manière dont des instruments accessibles peuvent transformer la gestion quotidienne des vergers, à condition que les producteurs soient correctement formés à leur utilisation et pleinement conscients de leur utilité.

Cependant, l'adoption de telles pratiques ne peut être envisagée sans un accompagnement solide. La vulgarisation agricole joue ici un rôle fondamental : elle permet de combler l'écart entre la recherche scientifique et la réalité du terrain, d'adapter les connaissances techniques aux contraintes spécifiques des exploitations, et d'offrir aux producteurs des solutions concrètes et applicables. Former, sensibiliser et équiper les agriculteurs, c'est leur donner les moyens de sécuriser leurs cultures, de mieux valoriser l'eau, de maintenir la vigueur physiologique de leurs arbres et, à terme, de renforcer la durabilité de leurs exploitations.

Ainsi, cette démarche ne se limite pas uniquement à l'optimisation du rendement ou à l'amélioration ponctuelle de la qualité des fruits. Elle vise une finalité plus large : la construction d'un modèle agricole plus résilient, respectueux des ressources naturelles et capable de s'adapter aux aléas climatiques et aux contraintes environnementales. La culture des agrumes, sensible mais stratégique, a tout à gagner de cette transition vers une agriculture raisonnée et durable, où le savoir-faire traditionnel, enrichi par l'apport de la science et des outils modernes, constitue la clé d'un développement harmonieux et durable.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- Agralis Services. (2024). Différences entre sonde tensiométrique et sonde capacitive. Consulté le 22 mars 2025, à partir de <https://agralis-services.fr/differences-entre-sonde-tensiometrique-et-sonde-capacitive/>
- Agroressources. (2022). Comment mettre en place les tensiomètres à eau ? Disponible sur <https://www.agroressources.com/utilisation-tensiometre-a-eau/>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, p. 156). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Algérie Eco. (2024). Agrumes : la production augmente à plus de 18 millions de quintaux. Disponible sur <https://www.algerie-eco.com/2024/01/30/agrumes-la-production-augmente-a-plus-de-18-millions-quintaux>
- Ayoub, M. (2009). Fertilisation des agrumes : Nouvelle approche pour le raisonnement (pp. 29–31). Rabat : Cabinet Phyto Consulting.
- Bausher, M. G., Cibrón, J. P., & Bowman, K. D. (2006). Citrus and its related species. *HortScience*, 41(4), 803–808.
- Beniken, L., El-Otmani, M., Ait-Oubahou, A., & Lovatt, C. J. (2013). Impact du stress hydrique sur la croissance et la productivité des agrumes. *Fruits*, 48(4), 393–403.
- Bergeron, D. (2005). Mieux irriguer avec les tensiomètres. Ministère de l’Agriculture, des Pêcheries et de l’Alimentation du Québec (MAPAQ), Direction régionale de la Capitale-Nationale. Consulté le 22 mars 2025, à partir de <https://www.agrireseau.net/pdt/documents/tensiometre.pdf>
- Berthomé, J., et al. (1989). Acquisition de références technico–économiques sur les matériels d’irrigation de surface (ARTE-MIS) : Rapport de synthèse. DDAF 13, 49 p.
- Cassan, A. (Dir.). (2008). Guide des agrumes (pp. 4–15). Institut Klorane, Fondation d’Entreprise pour la Protection et la Bonne Utilisation du Patrimoine Végétal. Lavour, France : Art & Caractère. Disponible sur <https://www.kloranebotanical.foundation/sites/default/files/documents/Guide-des-Agrumes-300dpi.pdf>

Références bibliographiques

- Castel, J. R., Buj, A., & Ramos, C. (1993). Water use efficiency of young citrus trees under drip irrigation. *Journal of Horticultural Science*, 48(5), 731–740.
- Chambre d’agriculture du Tarn. (2025). Les outils d’aide au pilotage de l’irrigation : les sondes tensiométriques et capacitives. Chambre d’agriculture du Tarn. Disponible sur https://tarn.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Occitanie/074_Inst-Tarn/4-AGROENVIRONNEMENT/Eau_OU_Irrigation/sondes_tensio_cap.pdf
- Chevalier, A. (1943). L’origine géographique des Aurantiacées (Agrumes) cultivées et les étapes de leur amélioration spécialement en Indochine. *Revue de botanique appliquée et d’agriculture coloniale*, 23(257), 15–25. https://www.persee.fr/doc/jatba_0370-3481_1943_num_23_257_1738
- CIRAD. (1951). Principes et méthodes d’irrigation des agrumes en Californie. *Fruits*, 4(4), 145–152.
- CIRAD. (2018, 8 février). L’évolution des agrumes revisitée. Disponible sur <https://www.cirad.fr/espace-presse/communiques-de-presse/2018/l-evolution-des-agrumes-revisitee>
- Curk, F., Luro, F., Minuto, G., & Nieddu, G. (2023). Les Agrumes du Nord de la Méditerranée. Ajaccio : Éditions Alain Piazzola, pp. 144–185, 182–221, 257–271. Disponible sur <https://www.inrae.fr/sites/default/files/agrumesnordmediterranee.pdf>
- Cui, Y.-J., Tang, A.-M., Mantho, A. T., & De Laure, E. (2008). Monitoring field soil suction using a miniature tensiometer. arXiv. Consulté le 16 mai 2025, sur <https://arxiv.org/abs/0801.2308>
- Decroix, Marc (1988). La micro-irrigation dans le monde. CEMAGREF Éditions, 1988, pp. 13–17. ISBN : 2-85362-134-0.

Références bibliographiques

- FAO. (1985). Irrigation Water Management: Irrigation Methods. Training Manual No. 5. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations, pp. 5–7.
- FAO. (2001). Les systèmes agro-alimentaires en Afrique. Chapitre 4 in L'Agriculture africaine : transformation et perspectives. Disponible sur <https://www.fao.org/4/w0078f/w0078f07.htm>
- FAO. (2002). Agrumes : Guide de production (pp. 86–93). Rome : FAO.
- FAO. (2005). Loi n° 05-12 relative à l'eau en Algérie. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, p. 3. Disponible sur <https://www.fao.org/faolex/results/details/en/c/LEX-FAOC054287/>
- FAO. (2012a). Analyse du coût d'aménagement et de la rentabilité de vergers d'agrumes – Présentation de différentes hypothèses. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, p. 4. Disponible sur <https://openknowledge.fao.org/bitstreams/fedb30e3-e2c3-4df7-8a4e-14fe344372a9/download>
- FAO. (2012b). Irrigation water requirement and water withdrawal by country. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponible sur <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.12345/8811>
- FAO. (2017). Gestion de l'eau en agriculture en Algérie. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, p. 54. Disponible sur <https://www.fao.org/4/a0232f/a0232f08.htm>
- FAO. (2017). Water for Sustainable Food and Agriculture: A report produced for the G20 Presidency of Germany. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Rome, Italie, pp. 7–8.

Références bibliographiques

- FAO. (2019). Modernisation des systèmes d'irrigation en Afrique. Disponible sur <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/73588141-ee28-4304-ba58-ad215bffe411/content>
- FAO. (2020a). L'état de l'alimentation et de l'agriculture 2020. Disponible sur <https://openknowledge.fao.org/bitstreams/fedb30e3-e2c3-4df7-8a4e-14fe344372a9/download>
- FAO. (2020). L'état de l'alimentation et de l'agriculture 2020 : Surmonter les défis liés à l'eau dans l'agriculture. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Rome, Italie, p. 7.
- FAO. (2022). Profil de Pays – Algérie. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, p. 7. Disponible sur https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/aquastat/pdf_files/DZA_algeria_cp.pdf
- FAO. (2025). Efficacité, productivité et durabilité de l'eau dans la région NENA – Algérie. Disponible sur <https://www.fao.org/in-action/water-efficiency-nena/countries/algeria/fr/>
- Fageria, N. K., Baligar, V. C., & Jones, C. A. (2009). Fertilizer Use Efficiency in Plants. CRC Press.
- Fondation d'Entreprise pour la Protection et la Bonne Utilisation du Patrimoine Végétal. (2008). Les agrumes du Nord de la Méditerranée. Institut Klorane, pp. 227–229, 234–239. Disponible sur <https://hal.inrae.fr/hal-04444444v1>
- France Pivots. (2024, 5 février). Tensiométrie : avantages et applications. Disponible sur <https://france-pivots.com/actus-pivots-irrigation/tensiometrie/>
- Franquesa, M. (2020). Nutrition minérale des agrumes en conditions méditerranéennes. Revue Agricole du Sud, 38(2), 43–49.

Références bibliographiques

- Gaïdi, M. F. (2025). La production d'agrumes dans la wilaya d'Annaba : Amélioration notable du rendement par hectare. El Watan. Disponible sur : <https://elwatan-dz.com/la-production-dagrumes-dans-la-wilaya-dannaba-amelioration-notable-du-rendement-par-hectare>
- Garcia-Sanchez, F., Perez-Perez, J. G., Botia, P., & Martinez, V. (2004). The response of young mandarin trees grown under saline conditions depends on the rootstock. *European Journal of Agronomy*, 24(2), 129–139.
- Géoconfluences. (2024). Paysages irrigués et défis agricoles. ENS de Lyon. Disponible sur : <https://geoconfluences.ens-lyon.fr>
- Gmitter, F. G., & Hu, X. (1990). The possible role of Yunnan, China, in the origin of contemporary citrus species (Rutaceae). *Economic Botany*, 44(2), 247–277. Disponible sur : <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02840491>
- Gomez-Cadenas, A., Tadeo, F. R., Primo-Millo, E., & Talon, M. (1994). Water stress effects on citrus leaf growth. *Plant Physiology*, 104(2), 409–414.
- Haghghatnia, N., et al. (2011). The impact of deficit irrigation on citrus physiology. *Irrigation Science*, 29(3), 157–166.
- Hall, D. G. (2008). Citrus root health and nutrient management. *Citrus Industry Magazine*, 89(7), 16–21.
- Hugo, A., et al. (2004). Drought stress response in citrus plants. *Journal of Experimental Botany*, 55(407), 423–432.
- INRAE. (2025). Gestion durable de l'irrigation agricole. Disponible sur : <https://www.inrae.fr>

Références bibliographiques

- Institut Technique de l'Arboriculture Fruitière et de la Vigne (ITAFV). (2021). La culture des agrumes (p. 4). ITAFV. Disponible à l'adresse : <https://www.itafv.dz/wp-content/uploads/2021/01/La-culture-des-agrumes.pdf>
- Irrrometer Company Inc. (2025). Tensiomètres de sol. AgriExpo. <https://www.agriexpo.online/fr/prod/irrometer-company-inc/product-173593-31130.html>
- Jardins de France. (2022). Agrumes en climat méditerranéen : techniques et soins. Jardins de France, 43(2), 14–20.
- Klorane Botanical Foundation. (2008). Guide des agrumes. Institut Klorane, p. 3. Disponible sur : <https://www.kloranebotanical.foundation/sites/default/files/documents/Guide-des-Agrumes-300dpi.pdf>
- Klorane Botanical Foundation. (2023). Guide des Agrumes (I. Escartin, Texte ; A. Boos, Ill.). Klorane Botanical Foundation.
- Kramer, P. J., & Boyer, J. S. (1995). Water relations of plants and soils. Academic Press, San Diego, CA.
- Kumar, A., & Sharma, V. (2009). Foliar Fertilization: A Tool for Efficient Nutrient Management. *Journal of Plant Nutrition*, 32(7), 1043–1060. <https://doi.org/10.1080/01904160902872841>
- Le Courrier d'Algérie. (2025). Tlemcen : Deux ateliers d'action pour développer la filière agrumicole. Le Courrier d'Algérie. https://lecourrier-dalgerie.com/tlemcen-deux-ateliers-daction-pour-developper-la-filiere-agrumicole/?utm_source

Références bibliographiques

- Luro, F. (2022). L'origine des agrumes : leur évolution et la naissance des espèces cultivées. Jardins de France. Récupéré de <https://www.jardinsdefrance.org/lorigine-des-agrumes-leur-evolution-et-la-naissance-des-especes-cultivees/>
- Maghreb Émergent. (2025). Algérie : la surproduction des agrumes inquiète les producteurs. <https://maghrebemergent.news/fr/algerie-la-surproduction-des-agrumes-inquiete-les-producteurs>
- Maison des Agrumes. (2011). Clémentinier : techniques culturales et entretien. Alger : Maison des Agrumes.
- Maison des Agrumes. (2012). Fertilisation minérale des vergers d'agrumes. Alger : Maison des Agrumes.
- Maison des Agrumes. (2012). L'irrigation localisée : système goutte-à-goutte. Alger : Maison des Agrumes.
-
- Maison des Agrumes. (2021). Maladies des agrumes et prévention. Alger : Maison des Agrumes.
-
- Messer, E. (2002). Agricultural origins and dispersals of citrus. Food and Nutrition Bulletin, 23(2), 124-133. <https://www.jstor.org/stable/2484743>
-
- METER Group. (2025). The researcher's complete guide to water potential. METER Group. <https://metergroup.com/fr/education-guides/the-researchers-complete-guide-to-water-potential/>
-
- Monney, P., & Bravin, E. (2010). Irrigation des arbres fruitiers (p. 4, 19). Station de recherche Agroscope Changins-Wädenswil (ACW).
-

Références bibliographiques

- Morton, J. F. (1987). Pummelo: *Citrus maxima*. In *Fruits of warm climates*. New Crop Resource Online Program, Center for New Crops and Plant Products, Purdue University. <https://ntbg.org/database/plants/detail/citrus-maxima>
-
- National Geographic France. (2014). Disparition de la mer d’Aral : les causes d’un désastre écologique. <https://www.nationalgeographic.fr/environnement/2014/10/disparition-de-la-mer-daral-les-causes-dun-desastre-ecologique>
-
- Needham, J. (1984). *Science and civilisation in China, Volume 4: Physics and physical technology, Part 3: Civil engineering and nautics* (pp. 271–274). Cambridge University Press.
-
- OECD. (2021). *Agriculture and water: Sustainability at a crossroads*. Paris : OECD Publishing.
-
- Office National des Statistiques (ONS). (2021). *La production agricole 2020–2021*. https://www.ons.dz/IMG/pdf/ProdAgricol2020_2021.pdf
-
- Postel, S. (1999). *Pillar of sand: Can the irrigation miracle last?* W.W. Norton & Company.
-
- Radio Algérie. (2024). Augmentation de la production d’agrumes en Algérie à plus de 18 millions de quintaux. <https://news.radioalgerie.dz/fr/node/39749>
-
- Rodriguez-Gamir, J., Ancillo, G., Primo-Millo, E., & Forner-Giner, M. A. (2010). Effect of deficit irrigation on gas exchange, water relations, and ion concentrations in citrus trees on different rootstocks. *Journal of Plant Physiology*, 147(4), 379-385.
-
- Rodriguez-Gamir, J., Primo-Millo, E., Forner, J. B., & Forner-Giner, M. A. (2011). Citrus rootstock responses to water stress: Effects on plant water relations, growth, and gas exchange. *Agricultural Water Management*, 98(11), 1827-1835.

Références bibliographiques

- Scora, R. W. (1975). On the history and origin of Citrus. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, 102(4), 349–375. <https://www.jstor.org/stable/2484743>
-
- SDEC France. (2023). Gestion de l'humidité des sols pour une production agricole optimale. <https://fr.sdec-france.com/gestion-de-lhumidite-des-sols-pour-une-production-agricole-optimale/>
-
- Serra Wittling, C., & Molle, B. (2017). Évaluation des économies d'eau à la parcelle réalisables par la modernisation des systèmes d'irrigation. IRSTEA. <https://hal.inrae.fr/hal-02408073>
-
- Spiegel-Roy, P., & Goldschmidt, E. E. (1996). *Biology of Citrus* (Chap. 1, pp. 4–18). Cambridge University Press.
-
- Statista. (2021). Production d'agrumes en Algérie entre 2010 et 2021. <https://www.statista.com/statistics/1182052/production-volume-of-citrus-fruits-in-algeria>
-
- Station Météo Agricole. (2025, 22 mars). Quel est le rôle du tensiomètre d'une station météo agricole ? <https://www.station-meteo-agricole.com/capteurs/tensiometre/>
-
- Syvertsen, J. P., Smith, M. L., & Allen, J. C. (1988). Growth and water relations of citrus seedlings irrigated at different soil water tensions. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 113(4), 840–844.
-
- Tezara, W., Mitchell, V. J., Driscoll, S. P., & Lawlor, D. W. (2002). Effects of water deficit and its interaction with CO₂ supply on the biochemistry and physiology of photosynthesis in sunflower. *Journal of Experimental Botany*, 53(375), 1781–1791.
-
- UNESCO. (2006). Aflaj Irrigation Systems of Oman. Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture. <https://whc.unesco.org/en/list/1207>
-

Références bibliographiques

- Vion, A. (2012). Irrigation en vergers méditerranéens. *Terres Agricoles du Sud*, 5(1), 18–24.
-
- Weather Spark. (2024). Climat mensuel à Boumerdès – Algérie. <https://weatherspark.com>
-
- Weenat. (2022). Fonctionnement de la sonde tensiométrique : on vous explique tout ! <https://weenat.com/sonde-tensiométrique-fonctionnement/>
-
- Wikipedia. (2023). Stubborn des agrumes. https://fr.wikipedia.org/wiki/Stubborn_des_agrumes
-
- Wu, Y., et al. (2008). Rootstock-mediated changes in leaf abscisic acid concentration and aquaporin expression. *Plant Physiology*, 148(3), 1507–1517.
-
- WWF. (2023). La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), p. 129. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.12345/4Nutjq3dMN3dor1o4cJhBF>